



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TIMO NISSINEN

LOISTEHOKOMPENSAATTORIN SÄÄTÖJÄRJESTELMIEN VER-
TAILU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Heikki Tuusa
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 6. huhtikuu-
ta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

NISSINEN, TIMO: Loistehokompensaattorin säätöjärjestelmien vertailu

Diplomityö, 82 sivua

Marraskuu 2011

Pääaine: Sähkövoimatekniikka

Tarkastaja: professori Heikki Tuusa

Avainsanat: SVC, avaruusvektori, säätöjärjestelmä, valokaariuuni, välkyntä

Staattinen loistehon kompensaattori (engl. Static Var Compensator, SVC) koostuu kiinteistä suodatinparistoista ja tyristoriohjatuista keloista (engl. Thyristor Controlled Reactor, TCR). TCR mahdollistaa SVC:llä portaattoman loistehon säädön tyristorien liipaisukulmaa muuttamalla. Portaattoman säädön ansiosta SVC soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa kompensoitavan loistehon määrä ei ole vakio. Teollisuudessa SVC:llä kompensoidaan yleensä terästehtaiden suuritehoisten kuormien loistehoa. Esimerkkeinä tällaisista kuormista ovat muun muassa valokaari- ja senkkauunit sekä valssilaitokset.

Valokaariuunin loistehon kompensoinnissa tärkein kompensointikriteeri on välkynnän vaimennus. Valokaariuunin voimakkaasti vaihteleva loisteho aiheuttaa sähköverkkoon välkyntää, jota kompensoinnilla pyritään vaimentamaan. Tämän työn tavoitteena oli kehittää valokaariuunin loistehon kompensointiin suunnitellulle SVC:lle vektorilaskentaan perustuva säätö ja vertailla sen suorituskykyä perinteisen vaihekääntöön perustuvan SVC:n säädön suorituskykyyn. Suorituskykyä mitattiin välkynnän vaimennuskertoimella, joka ilmaisee kuinka paljon SVC:llä saadaan vaimennettua valokaariuunin sähköverkkoon aiheuttamaa välkyntää.

Säätöjärjestelmä toteutettiin Nokian Digital Control -järjestelmällä (lyh. NDC), jonka jälkeen säätöjärjestelmän toiminnallisuutta tarkasteltiin reaaliaikasilmoitustoiminnalla. Kehitetty vektoripohjainen säätö perustuu kuormavirran symmetristen komponenttien eroteluun, minkä avulla TCR:lle saadaan laskettua joka hetki oikea liipaisukulma. Säädön suorituskyvyn kannalta tärkeimpänä kriteerinä oli vasteaika, sillä välkynnän vaimentamiseksi kuorman vaihteluihin on reagoitava nopeasti. Simuloinneissa käytettiin todellisten valokaariuunien mittausaineistoja, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimman todennukaiset. Myös simulointimallin verkkoparametrit valittiin todellisten komponenttien mukaan. Simuloinneilla tarkasteltiin tilanteita, joissa syöttävän verkon sekä päämuuntajan impedansseja muunneltiin. Näin saatiin selville säätöjärjestelmän toiminnallisuus erilaisissa sähköverkoissa.

Simulointitulosten perusteella vektorilaskentaan pohjautuvalla säädöllä saavutetaan muutaman prosentin parannus valokaariuunin aiheuttaman välkynnän vaimennukseen verrattuna perinteiseen SVC:n säätöön. Parhaimmillaan vektorisäätö oli simuloinneissa kymmenen prosentin vaihekääntöön perustuvaa säätöä parempi. Absoluuttisella välkynnän vaimennuskertoimella mitattuna vektorisäädöllä saavutettu paras suorituskyky oli 2,21. Tulosten perusteella vektorisäätöä voidaan pitää valokaariuunin loistehon kompensoinnin tapauksessa käyttökelpoisena tapana toteuttaa SVC:n avoin säätö. Vektorisäädön käyttäytymisen tarkempi selvittäminen vaatii kuitenkin lisäsimulointeja, joilla voidaan varmistua säädön toimivuudesta erilaisissa vaihtelevissa ympäristöissä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

NISSINEN, TIMO: Comparison of Control Systems for Reactive Power Compensator

Master of Science Thesis, 82 pages

November 2011

Major: Electrical Energy Engineering

Examiner: Professor Heikki Tuusa

Keywords: SVC, space vector, control system, electric arc furnace, flicker

Static Var Compensator (abbr. SVC) consists of fixed filter capacitor banks and thyristor controlled reactors (abbr. TCR). TCRs makes it possible to control SVC's reactive power continuously by changing the firing delay of thyristors. Because of this SVC is suitable for compensating loads, of which reactive power is not static. In industry, SVC is usually used to compensate steel works' loads with large demand of reactive power. Examples of this kind of loads are electric arc furnaces, ladle furnaces and rolling mills.

The most important criteria in a compensation of electric arc furnace is the reduction of flicker. The flicker is caused by furnace's fluctuating demand of reactive power, which is compensated by SVC. Purpose of this thesis was to develop a vector based control to the SVC for compensating the electric arc furnace and compare it's performance to performance of a conventional control of the SVC. The performance was measured by reduction of flicker compared to initial state.

The control system was implemented by Nokian Digital Control -system (abbr. NDC), and the resulting performance and functionality were examined using real time digital simulator. Developed vector based control is based on solving symmetrical components of load's current which are used to calculate the correct firing angle of TCRs at every moment. The most important issue of the control is to minimize the response time when compensating flicker as rapid reaction to fluctuations of the load is necessary. To achieve realistic results, the simulations were carried out using real measured data from electric arc furnaces. Also the parameters of the network model were chosen according the real delivery projects. Numerous simulations were done using various step down transformer and grid impedance values. This way behaviour of the control system was examined in different circumstances.

Based on simulations the vector control has few per cent better performance comparing to conventional control of SVC. The difference between the controls was ten per cent at its height. The performance achieved by vector control by absolute flicker reduction was 2.21. As a result of simulations the vector based control is usable way to make open-loop control for SVC when compensating reactive power of electric arc furnace. Additional simulations are required to find out more about the specific behaviour of vector control in different circumstances and operational environments.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Alstom Grid Oy:n tuotekehitysosastolla vuoden 2011 tammi-kuun ja marraskuun välisenä aikana. Diplomityö on osa SGEM-projektia.

Työn tarkastajana toimi professori Heikki Tuusa, jota haluan kiittää diplomityöni tarkastamisesta ja neuvoista työn sisältöön liittyen. Kiitän diplomi-insinööri Jarmo Ahoa työn ohjaamisesta ja kaikista asiantuntevista neuvoista sekä työn teoria- että käytännönsuuteen. Haluan kiittää koko tuotekehitysosastoa avusta ja neuvoista työn eri vaiheissa. Kiitän tekniikan tohtori Juha Turusta keskusteluista ja opastuksesta työn teoriaosuudessa. Kiitokset myös diplomi-insinööri Sami Kuusiselle, Jari Lavapuruolle ja Jarkko Peltolalle avusta SVC:n ohjausjärjestelmään liittyvissä kysymyksissä.

Lopuksi haluan lausua kiitokseni perheelleni ja avovaimolleni Riikalle tuesta ja kannustuksesta diplomityöni aikana.

Tampereella 18.10.2011

Timo Nissinen

SISÄLLYS

1.	Johdanto	1
2.	Staattisen loistehon kompensattorin rakenne	3
2.1.	Suurjännitelaitteisto.....	3
2.1.1.	Tyristorihjattu kela	5
2.1.2.	Suodatinparistot	9
2.2.	Ohjaus- ja suojausjärjestelmä.....	10
2.3.	Jäähdytysjärjestelmä	12
3.	SVC:n käyttö teollisuudessa	13
3.1.	Loistehon kompensointi	13
3.2.	Välkynnän vaimennus.....	14
3.3.	Kuorman balansointi	15
3.4.	Harmonisten yliaaltojen suodattaminen.....	17
3.5.	SVC:n jalanjälki	18
4.	Teollisuus-SVC:n säätöjärjestelmä	20
4.1.	Säätöjärjestelmän rakenne.....	20
4.2.	Säätöjärjestelmän toiminnallisuus.....	22
4.2.1.	Avoin säätö	24
4.2.2.	Takaisinkytketty säätö.....	26
4.2.3.	Tyristorien liipaisuohjeiden laskenta	26
5.	Teollisuus-SVC:n vektorisäätöjärjestelmä.....	29
5.1.	Säädön rakenne	29
5.1.1.	Avaruusvektorteoriaa	30
5.1.2.	Symmetristen komponenttien laskeminen vektorikoordinaatistossa ..	32
5.1.3.	Suskeptanssiohjeiden laskenta	34
5.1.4.	Vaihelukittu silmukka	36
5.2.	Vektorisäädön RSCAD-simuloinnit	41
5.2.1.	Vektorisäädön RSCAD-simulointimalli	43
5.2.2.	Simulointien tulokset ja johtopäätökset	43
6.	Säätöjärjestelmien reaaliaikasilmoinnit	50
6.1.	Simulointiympäristö.....	50
6.1.1.	Simulointilaitteisto	50
6.1.2.	Simulointimalli.....	52
6.2.	Säätöjärjestelmien VME-toteutukset	53
6.3.	RTDS-simuloinnit.....	54
6.3.1.	Hankala valokaariuuni	56
6.3.2.	Tavanomainen valokaariuuni	66
7.	Tulosten tarkastelu	75
8.	Yhteenveto	78
	Lähteet.....	80

MERKINNÄT JA LYHENTEET

Symbolit

\underline{a}	Yksikkövektori
B	Suskeptanssi
C	Kapasitanssi
f	Taajuus
i	Virran hetkellisarvo
I	Virran tehollisarvo
Im	Imaginäärikomponentti
j	Imaginääriyksikkö
k	PLL:n integrointipiirin vahvistus
K	Vahvistus
L	Induktanssi
P	Välkyntä; pätöteho
q	Hetkellinen imaginäärinen teho
Q	Loisteho
R	Resistanssi
Re	Reaalikomponentti
s	Kompleksimuuttuja
t	Aika
T	Jaksonaika; integrointiaika
T	Tyristori
u	Jännitteen hetkellisarvo
U	Jännitteen tehollisarvo
x	Muuttuja
X	Reaktanssi; muuttuja
$\underline{x(t)}$	Avaruusvektori
α	Sytytyskulma
θ	Synkronisen koordinaatiston asentokulma
σ	Johtokulma
τ	Ajanjakso
φ	Vaihekulma; stationäärisen koordinaatiston asentokulma
ω	Kulmataajuus

Alaindeksit

0	Nollakomponentti
1	Vaihesuureiden myötäkomponentti
2	Vaihesuureiden vastakomponentti
50Hz	Perustaajuinen suure
A, B, C	Vaiheet A,B,C
AB, BC, CA	Vaihevälit AB, BC, CA

C	Kondensaattoriin liittyvä suure
d	Avaruusvektorin reaaliakselin suuntainen komponentti synkronisessa koordinaatistossa
F	Suodatinparistoon liittyvä suure
i	I-säätimeen liittyvä suure
k	Yliaallon kertaluku
L	Kelaan liittyvä suure
LOAD	Kuormaan liittyvä suure
lt	Pitkäaikainen häiritsevyysindeksi
n	Avaruusvektorin vastakomponentti stationäärisessä koordinaatistossa
p	Avaruusvektorin myötäkomponentti stationäärisessä koordinaatistossa; P-säätimeen liittyvä suure
q	Avaruusvektorin imaginääriakselin suuntainen komponentti synkronisessa koordinaatistossa
ref	Asetusarvo
s	Synkroninen koordinaatisto
st	Lyhytaikainen häiritsevyysindeksi
SVC	SVC:n liittyvä suure
TCR	TCR:ään liittyvä suure
α	Avaruusvektorin reaaliakselin suuntainen komponentti stationäärisessä koordinaatistossa
β	Avaruusvektorin imaginääriakselin suuntainen komponentti stationäärisessä koordinaatistossa

Lyhenteet

AD	Analog to Digital. Analogisesta digitaaliseksi.
CMI	Communication and Maintenance Interface.
DA	Digital to Analog. Digitaalisesta analogiseksi.
DSOGI	Dual Second Order Generalized Integrator.
FACTS	Flexible AC Transmission System.
FC	Fixed Capacitor. Kiinteä kondensaattoriparisto.
HMI	Human Man Interface. Käyttöliittymä.
HVDC	High Voltage Direct Current. Suurjännitteinen tasasähkövoimansiirto.
I/O	Input/Output.
IEC	International Electrotechnical Commission. Kansainvälinen sähkötekniikan standardointiorganisaatio.
IP	Industrial Pack.
NDC	Nokian Digital Control. Digitaalinen säätöjärjestelmä.
PCC	Point of Common Coupling. Kompensaattorin verkkoon liityntäpiste.
PI-säädin	Proportional-Integral-säädin.
PLC	Programmable Logic Controller.
PLL	Phase-Locked Loop. Vaihelukittu silmukka.

PMC	PCI Mezzanine Card.
RISC	Reduced Instruction Set Computing.
RMS	Root Mean Square Value. Tehollisarvo.
RTDS	Real Time Digital Simulator. Reaaliaikainen digitaalisimulaattori.
SHARC	Super Harvard Architecture Single-Step Computer.
SOGI	Second Order Generalized Integrator.
SRF	Synchronous Reference Frame.
SVC	Static Var Compensator. Staattinen loistehon kompensattori.
TCR	Thyristor Controlled Reactor. Tyristori-ohjattu kela.
TSC	Thyristor Switched Capacitor. Tyristorikytetty kondensaattori.
TSR	Thyristor Switched Reactor. Tyristorikytetty kela.
VME	Versa Memory Eurocard.

1. JOHDANTO

Loistehokompensaattoreita käytetään loistehon kompensointiin sekä sähkönsiirtoverkoissa että teollisuudessa. Loistehon kompensointi on tärkeää, sillä kompensoinnilla saadaan vähennettyä loistehon siirrosta aiheutuvia häviöitä, nostettua verkon pätötehon siirtokapasiteettia sekä pienennettyä loistehon aiheuttamia jännitteen paikallisia muutoksia. Loistehon kompensointiin käytetään sekä kiinteää kompensointia, että aktiivisia kompensointilaitteita. Kiinteällä kompensoinnilla tarkoitetaan passiivisia komponentteja, jotka kuluttavat tai tuottavat kiinteän määrän loistehoa. Aktiivisten kompensointilaitteiden loisteho on säädeltävissä, jolloin kompensointilaitteet soveltuvat tilanteisiin, joissa kompensoitavan loistehon määrä vaihtelee.

Aktiiviset kompensaattorit kuuluvat FACTS-laitteisiin (engl. Flexible AC Transmission System), jotka sisältävät tehoelektroniikkakomponentteja, joilla loistehon säätö saadaan aikaiseksi. Osassa FACTS-laitteista käytetään kytkinkomponentteina tyristoreja ja osassa täysin ohjattavia transistoreja. Tyristoreja käytetään muun muassa SVC:ssä sekä TCSC:ssä (engl. Thyristor Controlled Series Capacitor). Täysin ohjattavia transistoreja käytetään muun muassa STATCOM-laitteissa (engl. Static Synchronous Compensator). Kompensaattorissa käytetyt kytkinkomponentit määräävät suurelta osin laitteen ominaisuudet, ja laitteen säätöjärjestelmä tulee rakentaa käytettyjen kytkinkomponenttien mukaan. Tässä diplomityössä rajoitutaan vertailemaan kahta SVC:lle suunniteltua säätöjärjestelmää.

SVC koostuu kiinteistä tai tyristorilla kytkettävistä suodatinparistoista ja TCR:stä, jolla saadaan aikaan SVC:n toiminnallisuus, sillä sen avulla SVC:n loistehoa voidaan säädellä portaattomasti. SVC:n etuina verrattuna kehittyneempiin FACTS-laitteisiin on alhaisempi hinta sekä pienemmät häviöt, sillä täysin ohjattavien kytkinkomponenttien häviöt ovat tyristoreiden häviöitä korkeammat. Energiatehokkuuden merkitys kasvaa nykyään entisestään, kun pyritään yhä ympäristöystävällisempiin energian tuotanto- ja siirtoratkaisuihin.

Teollisuudessa SVC:tä käytetään yleisimmin terästeollisuuden yhteydessä. Terästeollisuuden prosesseissa käytettävät tehot ovat suuria, joten loistehon kompensointi on taloudellisesti järkevää, sekä joissain tapauksissa myös paikallisen sähköverkkoyhtiön pakottamaa. Yksi kompensointia vaativa laite terästehtailla on valokaariuuni. Valokaariuunin kuluttama loisteho vaihtelee voimakkaasti sulatuksen aikana, ja tämä vaihtelu aiheuttaa välkyntää sähköverkkoon. Valokaariuunien yhteydessä SVC:llä pyritään kompensoimaan uunin ottama loisteho reaaliaikaisesti, jolloin sähköverkosta katsottuna loisteho pysyy vakioarvossaan eikä välkyntää synny. Tyristoriventtiilien ominaisuuksien vuoksi SVC:llä ei kuitenkaan päästä täysin reaaliaikaiseen kompensointiin. SVC:n avul-

la valokaariuunin sähköverkkoon aiheuttamaa välkyntää voidaan vaimentaa noin puoleen alkuperäisestä.

Valokaariuunin aiheuttaman välkynnän vaimennus edellyttää SVC:n säädöltä nopeaa vasteaikaa, sillä välkynnän vaimentamiseksi SVC:n tulee ehtiä mukaan kuorman nopeisiin vaihteluihin. Säädön pitää myös pystyä toimimaan vaihekohtaisesti, sillä SVC:llä pyritään myös tasapainottamaan kuormituksen epäsymmetriaa. Perinteisesti SVC:n säätö on toteutettu vaihekääntöön perustuvalla säädöllä, jossa kuorman vaihekohtainen hetkellinen loisteho saadaan laskettua vaihesiirrettyjen kuorman virran ja jännitteen avulla. Digitaalisten säätöjärjestelmien myötä SVC:lle on kehitetty myös toisenlainen säätöratkaisu, joka perustuu avaruusvektorilaskentaan. Vektorilaskennassa kuorman vaihekohtainen hetkellinen loisteho lasketaan kuormavirran ja -jännitteen symmetristen komponenttien avulla.

Tämän työn tavoitteena on kehittää vektorilaskentaan perustuva säätöratkaisu valokaariuunin loistehon kompensointiin käytettävälle SVC:lle ja vertailla säädön suorituskykyä perinteisen SVC:n säädön suorituskykyyn. Tällä hetkellä Alstom Grid Oy käyttää teollisuudessa käytävissä SVC:ssä perinteistä vaihekääntöön perustuvaa säätötapaa. Perinteisellä säädöllä saavutetaan hyvä suorituskyky, mutta Alstom Grid Oy haluaa selvittää myös vektorilaskentaan perustuvan säädön suorituskyvyn. Suorituskykyä mitataan tässä työssä välkynnän vaimennuksella kompensoitaessa valokaariuunin loistehoa.

Työn toisessa ja kolmannessa luvussa esitellään teollisuudessa käytettävän SVC:n rakennetta sekä SVC:n käyttöä teollisuudessa sähkön laadun parantamiseksi. Neljännessä luvussa käydään läpi perinteisen vaiheenkääntöön perustuvan säädön rakennetta ja toimintaa sekä SVC:n varsinaista säätölaitteistoa. Viidennessä luvussa käsitellään vektorilaskentaan perustuvaa säätöä, joka voidaan toteuttaa joko tehon tai virran hetkelisarvoihin perustuen. Luvussa esitellään työssä valittu säätöratkaisu ja simuloinnit, joilla säätöratkaisun toimivuutta tarkasteltiin staattisessa tilanteessa. Kuudennessa luvussa kerrotaan säätöjärjestelmille suoritetuista reaaliaikasimuloinneista. Luvun aluksi esitellään käytetyn reaaliaikasimuloinnin ympäristö sekä käydään läpi säätöjärjestelmän ominaisuuksia. Tämän jälkeen esitellään simuloinnista saadut tulokset. Simulointien tulosten ja virhelähteiden analysointi suoritetaan luvussa seitsemän.

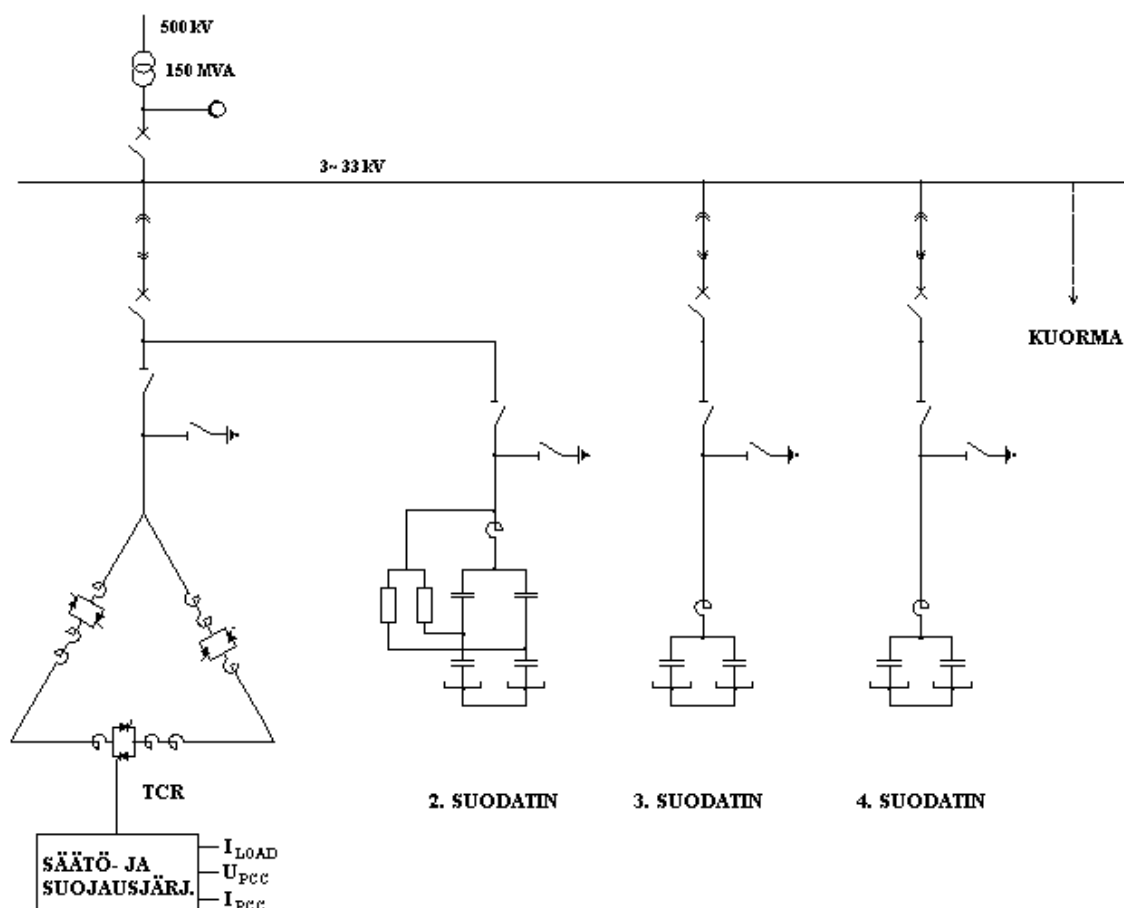
2. STAATTISEN LOISTEHON KOMPENSAATTORIN RAKENNE

Staattisia loistehon kompensoattoreita käytetään sekä sähkönsiirtoverkoissa että teollisuuslaitosten yhteydessä parantamaan sähkön laatua. SVC pyrkii loistehoa säättämällä pitämään liitäntäpisteensä jännitteen halutussa arvossa. Siirtoverkoissa tämä tarkoittaa verkon loistehotasapainon ylläpitämistä muuttuvissa verkon kuormitustilanteissa, kun taas teollisuuslaitosten tapauksessa SVC:llä pyritään vastaamaan kuorman nopeisiin loistehon muutoksiin, jotta ne eivät vaikuttaisi verkon jännitteisiin. Tavoitteet ovat pohjimmiltaan samat molemmissa tapauksissa, mutta käytännössä laitteiden räätälöinti käyttötarkoitukseen on sekä parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi että taloudellisista syistä välttämätöntä. Räätälöinti tarkoittaa tässä tapauksessa laitteen kokoonpanon ja säädön suunnittelua käyttötarkoitukseen parhaiten sopivaksi. Teollisuudessa käytettävät SVC:t ovat teholtaan pienempiä, ja niiden jatkuva kompensointiteho rajoittuu yleensä kapasitiiviselle puolelle. Siirtoverkkojen kompensoattorit pystyvät toimimaan myös induktiivisena kuormana. Vasteajat ovat sen sijaan teollisuuden kompensoattoreilla lyhyempiä kuin siirtoverkkojen SVC:llä. Lyhyt vasteaika on välttämätön, jotta kuorman aiheuttamaa välkyntää voidaan kompensoida.

SVC:n rakenne voidaan jakaa kolmeen osaan: suurjännitelaitteisto, ohjaus- ja suojausjärjestelmä sekä jäähdytysjärjestelmä. Kuvassa 2.1 on esitetty teollisuus-SVC:n yksivaiheinen periaatekuva. Kuvassa näkyy suurjännitelaitteisto sekä säätö- ja suojausjärjestelmä. Apujärjestelmää ei ole piirretty kuvaan.

2.1. Suurjännitelaitteisto

SVC:n toiminnallisuuden muodostaa suurjännitelaitteisto, johon kuuluvat kelat, kondensaattorit, tyristorit, katkaisijat, kiskostot ja mittamuuntajat. Päämuuntaja (kuvassa 2.1 vasemmassa yläreunassa) ei kuulu SVC-toimituksiin, mutta sen voidaan katsoa kuuluvan suurjännitelaitteistoon. Päämuuntajan yläjännitepuoli on kytkettynä siirtoverkkoon ja alajännitepuoli keskijännitekiskostoon, jonka jännite on yleensä 20-35 kV:n välillä. Keskijännitekiskostoon kytketään TCR, suodatinparistot ja kuorma, joka on tyyppillisesti valokaariuuni, senkkauuni tai valssaamo. SVC:n säätöjärjestelmään tarvittavat mittaukset saadaan mittamuuntajilta sekä kuorman kytkentäpisteestä että SVC:n liitäntäpisteestä (engl. Point of Common Coupling, PCC), jonka paikka määritellään tapauskohtaisesti päämuuntajan ylä- tai alajännitepuolelle. Yleensä se kuitenkin sijaitsee päämuuntajan yläjännitepuolella.



Kuva 2.1. Tyypillisen teollisuus-SVC:n yksivaiheinen periaatekuva.

SVC:n loisteho tuotetaan suodatinparistoilla ja säädetään TCR:llä. TCR voi olla kytkettynä kolmioon tai tähteen riippuen kompensoitavasta kuormasta ja kompensointitavoitteista. Joissakin kompensointilaitteissa käytetään myös molempia TCR-kytkentöjä. Suodatinparistot ovat kiinteitä, eli ne ovat kiinni keskijännitekiskoissa katkaisijan välityksellä. Siirtoverkkojen SVC:ssä käytetään myös tyristorikytettyjä kondensaattoreita (engl. Thyristor Switched Capacitor, TSC), jolloin kondensaattoreita voidaan kytkeä verkkoon kompensointitilanteen mukaan. Suodatinparistot toimivat myös yliaaltosuodattimina, joilla saadaan eliminointua valokaariuunin sekä TCR:n tuottamia yliaaltoja. Suodatinparistot viritetään kuorman ja TCR:n merkittävimmille yliaalloille ja esimerkiksi valokaariuunin tapauksessa suodattimet viritetään tyypillisesti toiselle, kolmannelle ja neljännelle yliaallolle, kuten kuvassa 2.1. Valssaamon ollessa kuormana suodattimet viritetään tyypillisimmin viidennelle, seitsemännelle ja yhdennelletoista yliaallolle. Seuraavissa alaluvuissa käydään tarkemmin läpi TCR:ää ja suodatinparistoja. [1], [2]

Kuvassa 2.2 on esitetty kuva SVC:n ulkolaitteista. Kuvassa keskellä näkyvät TCR-kelat ja niiden takana kolme suodatinparistoa sekä vasemmalla puolella vaimennuskelat, jotka vaimentavat TCR-kelojen hajakapasitanssien aiheuttamaa resonanssia.



Kuva 2.2. SVC:n ulkolaitteet. [3]

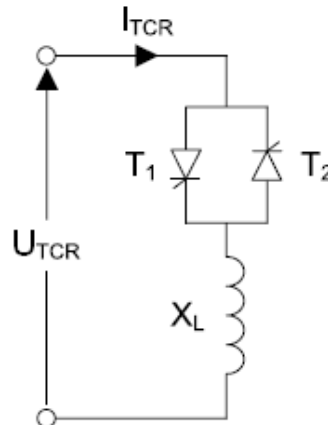
2.1.1. Tyristoriohjattu kela

Tyristoriohjattu kela on yksi SVC:n tärkeimmistä rakenneosista, sillä se mahdollistaa SVC:n portaattoman loistehon säädön. TCR on määritelmän mukaan kuormituksen rinnalle kytketty kela, jonka reaktanssia voidaan säätää tyristoreilla. Määritelmään nojautuen TCR mallinnetaan hyvin usein susceptanssina, jonka arvo on riippuvainen tyristorien sytytyskulmasta. Tyristori-kytketty kela (engl. Thyristor Switched Reactor, TSR) on kytkennältään TCR:ää vastaava, mutta tyristoriventtiilejä ei ohjata kuin täysin johtavaan tilaan tai ei ollenkaan. TSR:iä käytetään verkosto-SVC:issä lisäämään induktiivista loistehoa, pienentämään TCR:n kokoa ja siten siitä aiheutuvia harmonisia yliaaltoja. Teollisuus-SVC:ssä TSR:iä ei käytetä. [1], [4]

TCR:n yksivaiheinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 2.3. TCR koostuu vastarinnan- ja tyristoriparista sekä ilmasydämisestä kelasta. Käytännön toteutuksissa kela on jaettu kahteen osaan ja sijoitettu tyristoriparin molemmiin puoliin, sillä tällöin toisen kelan vikaantuessa jää toinen kela vielä rajoittamaan virtaa ja näin estämään tyristorien tuhoutumisen. Riittävän jännitekestoisuuden saavuttamiseksi tyristoreita kytetään sarjaan tarvittava määrä. Tyristoreista johtovuorossa ovat ne, joiden anodikatodijännite on positiivinen. Kuvan mukaisessa kytkennässä tyristori T1 johtaa syöttöjännitteen ollessa positiivinen ja tyristori T2 syöttöjännitteen ollessa negatiivinen. [1], [5], [6]

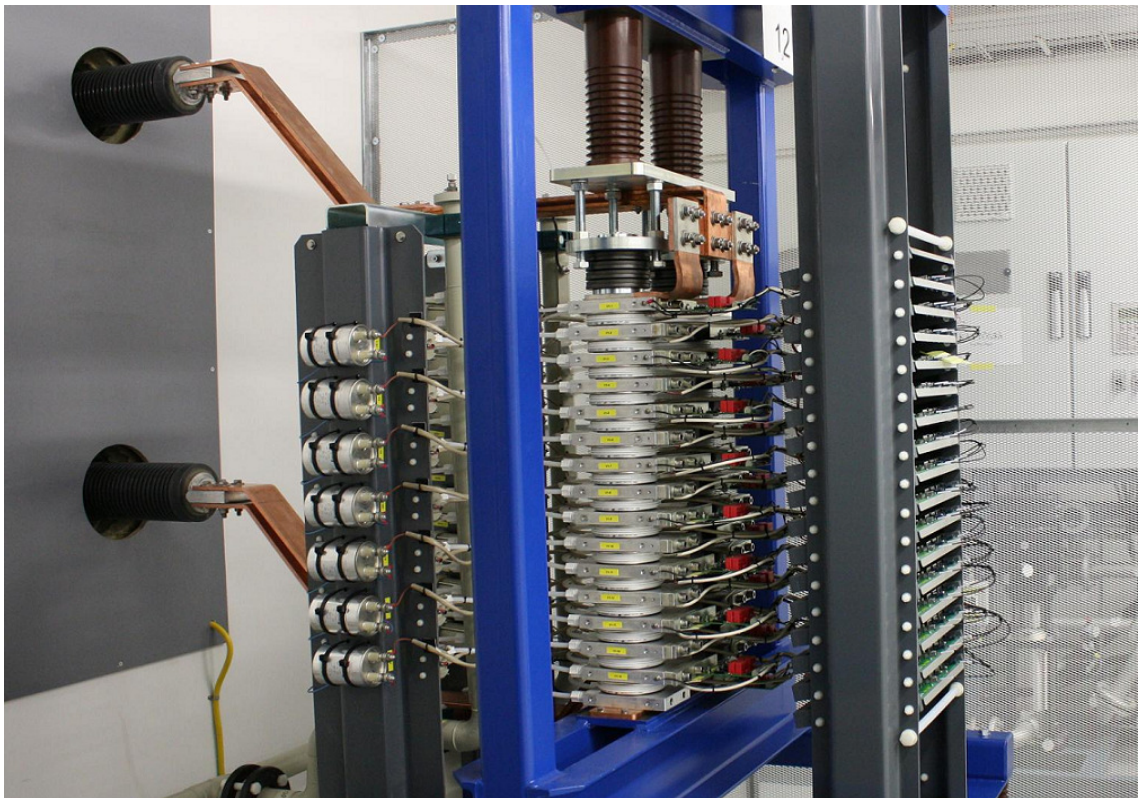
TCR:n säätö perustuu tyristorien liipaisukulman säätöön. Liipaisukulmalla saadaan säädettyä kuristimen läpi kulkevan virran suuruutta. Virran suuruuden säätö taas vastaa kuristimen tehollisen reaktanssin säätöä, sillä reaktanssin muutos vaikuttaa kuris-

timen kuluttaman loistehon suuruuteen, kuten virrankin muutos. Näin TCR voidaan ajatella säädettäväksi susceptanssiksi. [4]



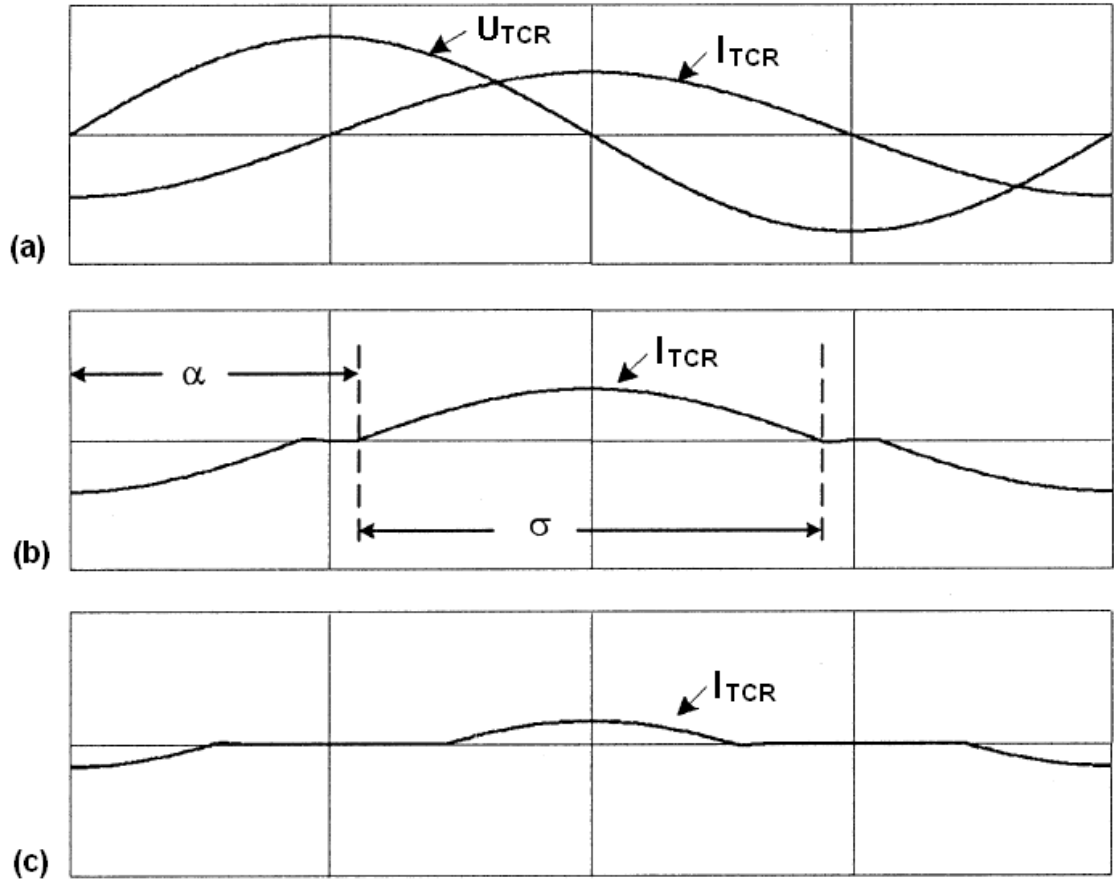
Kuva 2.3. TCR:n yksivaiheinen sijaiskytkentä. [5]

Kuvassa 2.4 on esitetty SVC:n yhden vaiheen tyristoriventtiili, jossa sarjakytketyt tyristorit näkyvät keskellä. Tyristorien oikealla puolella näkyvät kortit, joilla venttiilien ohjauskaapilta saapuvat optiset liipaisupulssit jaetaan tyristoreille. Tyristorien vasemmalla puolella näkyvät vaimennuspiirin kondensaattorit, jotka ovat kytketty tyristorien rinnalle vaimentamaan kommutointitilanteessa tyristorien yli syntyvää jännitepiikkiä. Vasemmalla kuvassa näkyvät tyristoriventtiilin liitântäkiskot, joilla tyristoriventtiili kytketään TCR-keloihin.



Kuva 2.4. Yhden vaiheen tyristoriventtiili. [3]

TCR:n tyristorien liipaisukulmaa voidaan säätää välillä 90° - 180° ja liipaisukulman ollessa 90° on TCR:n läpi kulkeva virta suurimmillaan. Vastaavasti liipaisukulman ollessa 180° ei TCR:n kautta kulje virtaa enää lainkaan. Kuvassa 2.5 on esitetty periaatteellisia virran käyrämuotoja eri liipaisukulmien arvoilla. Tyristorien liipaisukulmaa on merkitty kuvassa α :lla ja tyristorien johtokulmaa σ :llä. Liipaisukulman nollakohta on jännitteen puolijakson nollakohdassa. Alle 90° liipaisukulmilla virtaan syntyy de-komponentteja, jolloin tyristoriparin symmetrinen toiminta häiriintyy. Tämän vuoksi alle 90° asteen liipaisukulmia ei käytetä.



Kuva 2.5. TCR:n periaatteellisia virran ja jännitteen käyrämuotoja eri sytytyskulman arvoilla. (a) $\alpha = 90^\circ$ ja $\sigma = 180^\circ$, (b) $\alpha = 100^\circ$ ja $\sigma = 160^\circ$, (c) $\alpha = 130^\circ$ ja $\sigma = 100^\circ$. [4]

TCR:n liipaisukulman vaikutus TCR:n susceptanssiin voidaan johtaa olettamalla TCR:n jännite sinimuotoiseksi [1]:

$$B_{\text{TCR}}(\alpha) = B_{\text{max}} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right), \quad (1)$$

jossa

$$B_{\text{max}} = \frac{1}{\omega L}. \quad (2)$$

Susceptanssin avulla saadaan laskettua TCR:n virta yhtälöstä (3):

$$I_1(\alpha) = U_{\text{TCR}} B_{\text{TCR}}(\alpha), \quad (3)$$

ja edelleen TCR:n yksivaiheinen loisteho yhtälöstä (4):

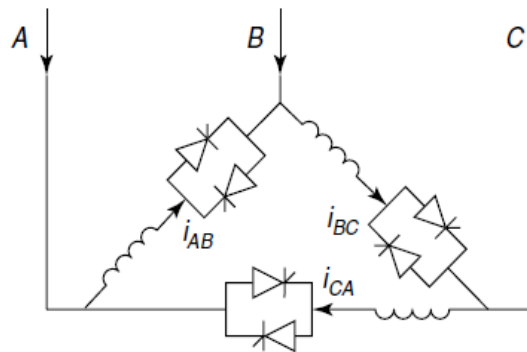
$$Q_{\text{TCR}} = U_{\text{TCR}}^2 B_{\text{TCR}}(\alpha). \quad (4)$$

Tyristori on niin kutsuttu luonnollisesti kommutoituva komponentti, eli se sammuu vasta, kun sen läpi kulkeva virta saavuttaa nollakohdan. Tämän perustella puhtaan reaktanssin tapauksessa johtokulman ja sytytyskulman yhteys on helposti määritettävissä:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha). \quad (5)$$

Liipaisukulma voidaan korvata johtokulmalla kaikissa edellä mainituissa lausekkeissa yhtälöä (5) käyttäen. [1]

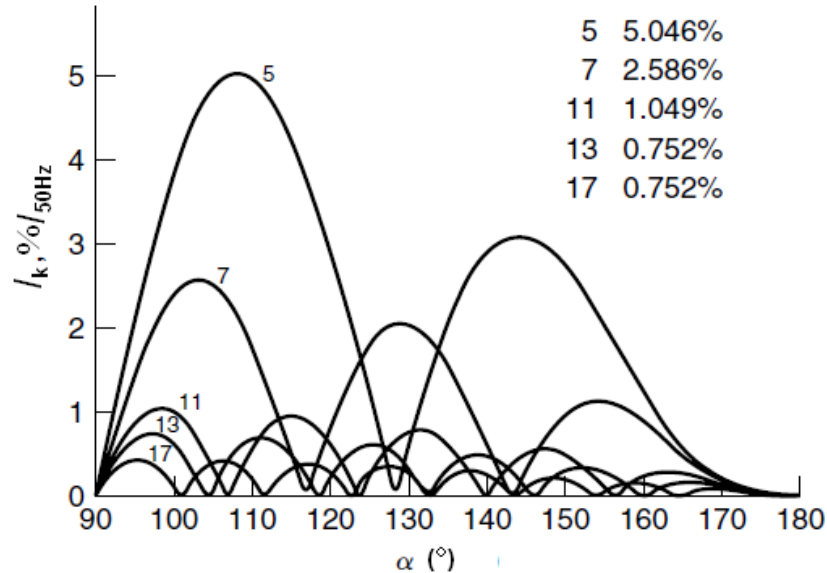
Kolmivaiheisissa kompensointijärjestelmissä käytetään yleensä kolmioon kytkettyä TCR:ää, joka on esitetty kuvassa 2.6. Kolmiokytkentä on TCR:n aiheuttamien yliaaltojen kannalta hyödyllinen, sillä teoriassa symmetrisellä ohjauksella kolmella jaolliset yliaallot eivät siirry TCR-kytkennästä verkkoon. Käytännössä kolmion täydellinen tasapaino on kuitenkin hankala saavuttaa, sillä verkon jännitteissä voi ilmetä epäsymmetriaa tai kelojen reaktanssit eivät välttämättä ole täysin identtisiä. Kolmella jaollisten yliaaltojen määrä on kuitenkin selvästi pienempi kuin vastaavalla tähteen kytketyllä TCR:llä. Kolmioon kytketyn TCR:n kuluttama loisteho on myös tähtikytketyn TCR:n loistehoa suurempi, sillä kolmiokytkennässä TCR on kytketty pääjännitteeseen. Tähteen kytkettyä TCR:ää käytetään lähinnä 4-johdinjärjestelmän kompensointitarpeissa, sillä tähtikytkennällä saadaan kompensoitua myös kuormavirran nollakomponenttia. [6]



Kuva 2.6. Kolmioon kytketty TCR. [1]

Kuten kuvasta 2.5 voidaan todeta, TCR:n läpi kulkevan virran käyrämuoto ei ole sinimuotoista liipaisukulman ollessa yli 90° . Tämä tarkoittaa sitä, että TCR tuottaa harmonisia yliaaltoja. Mikäli vastarinnankytkettyjä tyristoreja ohjataan samalla ohjauskulmalla, tuottaa TCR ainoastaan parittomia yliaaltoja, sillä parillisia yliaaltoja ei muodostu, kun muodostuvat virtapulssit ovat puolialtosymmetrisiä. Kolmioon kytketyn TCR:n tuottamien harmonisten yliaaltojen suuruuksia on esitetty kuvassa 2.7. Siinä on esitetty harmonisten yliaaltojen osuus perusaaltoon suhteutettuna tyristorien sytytyskulman funktiona. Kuten kuvasta nähdään, yliaaltojen suuruus vaihtelee suuresti sytytyskulman muuttuessa, eikä eri yliaaltojen maksimiarvot osu samoille sytytyskulman arvoille. Kuvaa tarkastellessa on huomattava, että se on esitetty kolmioon kytketylle TCR:lle, jol-

loin kolmella jaolliset yliaallot eliminoituvat kytkennässä. Kuvassa on esitetty myös viiden merkittävimmän yliaallon prosentuaaliset suuruudet verrattuna perustaajuiseen komponenttiin. Harmoniset yliaallot voidaan laskea virrasta Fourier'n menetelmällä, jota on kuvattu tarkemmin lähteissä [1] ja [7]. [1], [6], [7]



Kuva 2.7. Kolmioon kytketyn TCR:n tuottamat yliaallot sytytyskulman funktiona symmetrisellä ohjauksella. [1]

TCR:n tuottamia yliaaltoja voidaan vähentää erilaisilla useiden TCR:ien kytkennöillä. Yksi tapa on kytkeä rinnan pienitehoisia TCR:ia, joista ainoastaan yhtä ohjataan osateholla ja loppuja joko täydellä tai nollateholla. Näin jokaisen yliaallon amplitudi putoaa TCR:ien lukumäärään verrannolliseen osaan perusaallon kokonaisarvoon nähden. Eli neljän TCR:n ollessa kytkettynä rinnan yliaaltojen amplitudi putoaa neljäsosaan kokonaisarvosta. TCR:ien rinnankytkennän etuna on myös kytkentähäviöiden pieneneminen verrattuna yhteen TCR:ään, kun osa TCR:istä ohjataan nollateholle.

Toinen tapa vähentää yliaaltoja on kytkeä kaksi SVC:tä rinnan päämuuntajan kautta, jonka toisiossa on kaksi käämitystä, toinen tähdessä ja toinen kolmiossa. Tällä tavalla TCR:ien jännitteisiin ja edelleen virtoihin luodaan 30° keskinäinen vaihe-ero. Tällä vaihesiirrolla saadaan eliminoitua yliaaltovirrat, jotka ovat järjestysluvultaan $6(2k-1)-1$ ja $6(2k-1)+1$, missä $k = 1, 2, 3, \dots$. Neljä ensimmäistä eliminoituvaa yliaaltoa ovat siis 5., 7., 17. ja 19. [6]

2.1.2. Suodatinparistot

SVC-laitteistoissa käytetään suodatinparistoja tarvittavan loistehon tuottamiseen sekä yliaaltojen suodattamiseen. Suodatinparistot voivat olla kytkettynä SVC:n TCR:ään kiinteästi tai ne voivat olla erotettavissa kiskostosta joko katkaisijoilla tai tyristoreilla. Teollisuuden SVC-laitteissa suodatinparistot kytketään katkaisijoiden välityksellä, sillä suodatinparistoille ei ole irtikytkentätarvetta normaali käyttöolosuhteissa. Siirtoverkoissa käytettävillä SVC:illä TSC:illä saadaan pienennettyä SVC:n häviöitä, sillä kondensaat-

toreita voidaan irrottaa verkosta osakuormituksen aikana, eikä TCR:llä ei tarvitse kompensoida niin suurta loistehomäärää. Tällöin virrat pienenevät ja sitä myötä myös häviöt. Teollisuus-SVC:n tapauksessa häviöt eivät nouse merkittäviksi pienempien tehojen vuoksi ja käytännössä teollisuuden kuormitus on aina induktiivista, joten suodatinparistoja tarvitaan kuorman kompensointiin. Siirtoverkoissa kompensoitava loisteho voi olla välillä myös kapasitiivista, jolloin SVC:n tulee kuluttaa loistehoa, jotta tehokerroin saataisiin nimelliseksi. Tällöin kondensaattoreita täytyy kytkeä irti SVC:stä, jotta TCR:ät pystyvät kuluttamaan kaiken verkosta tulevan loistehon. Osa verkosto-SVC:n kondensaattoreista voidaan kytkeä myös pelkän katkaisijan taakse, mutta tällöin kondensaattoreita ei kytkeä irti verkosta kuin pitkien tehon kausivaihtelujen vuoksi. Tällainen kausivaihtelu voi olla esimerkiksi kesäaika, jolloin verkon kuormitus on talviaikaa pienempää.

Teollisuus-SVC:ssä suodatinparistot kytketään katkaisijoiden välityksellä TCR:ien rinnalle. Suodatinparistot tuottavat tarvittavan loistehon sekä eliminoivat merkittävimmät yliaallot. Vaikka suodatinparistot kytketään katkaisijoilla, niitä ei normaalitoiminnan aikana kytkeä irti verkosta. Katkaisijoita käytetään ainoastaan erottamaan paristot verkosta vikatilanteessa tai huoltotoimenpiteiden ajaksi. Joissakin tapauksissa suodatinparistoja voidaan kytkeä myös suoraan TCR:ään. Tällöin TCR:n rinnalle kytketään esimerkiksi toisen yliaallon suodatin. Tällaisen kytkennän tärkeimpänä etuna voidaan pitää taloudellisia säästöjä katkaisijoiden määrän vähenemisessä, sillä TCR ja suodatinparisto ovat saman katkaisijan takana. Toisena etuna on katkaistavan virran pieneneminen erotettaessa TCR:ää ja suodatinparistoa verkosta, koska TCR:llä pystytään kompensoimaan kondensaattoripariston tuottama loisteho, joten katkaistavaksi jää ainoastaan TCR:n ja kondensaattoriparistojen yhteisloisteho.

2.2. Ohjaus- ja suojausjärjestelmä

SVC:n ohjaus- ja suojausjärjestelmä sisältää kaikki ne osat, joilla SVC:n dynaamiset ominaisuudet saadaan aikaan. Ohjausjärjestelmään sisältyy varsinainen säätöjärjestelmä sekä tyristoriventtiilien ohjauslaitteet ja suojausjärjestelmään kaikki SVC:n suojaukseen vaadittavat toiminnot. Laitetasolla ohjaus- ja suojausjärjestelmä koostuu neljästä ohjauskaapista, joista kaksi on säätöjärjestelmää, yksi suojareleitä ja yksi tyristoriventtiilien ohjausta varten. Ohjaus- ja suojausjärjestelmään voidaan myös katsoa kuuluvaksi toiminnallisuuden aikaansaavat suurjännitepuolen komponentit, kuten tyristorit, katkaisijat ja mittamuuntajat. Käyttöliittymän ohjaus- ja suojausjärjestelmään muodostaa HMI (engl. Human Machine Interface), jota voidaan ohjata joko paikallisesti tai kaukokäyttönä. Tässä työssä keskitytään säätö- ja suojausjärjestelmän logiikkaosuuteen ja käyttöliittymään, joten suurjännitekomponentteja ei esitellä aikaisempaa tarkemmin. [8]

Säätöjärjestelmä pyrkii ohjaamaan tyristoriventtiilejä siten, että kuorman loistehonmuutokset eivät näy verkossa. Käytännössä tämä tarkoittaa jatkuvaa kuorman virran ja jännitteen mittausta sekä tyristoriventtiilien liipaisuohjeiden laskentaa. Liipaisuohjeet

määritetään siten, että jokaisella hetkellä kuorman ja SVC:n loisteho vastaisivat toisiinsa. Tämän perusteella on helppo mieltää, että viiveet liipaisuohjeen laskennassa aiheuttavat dynaamisen kuorman tapauksessa virhettä kokonaisloistehoon, sillä SVC ei pysty reagoimaan kuorman muutoksiin riittävän nopeasti. SVC:n ohjausalgoritmin nopeus onkin erittäin merkittävä tekijä, kun pyritään kompensoimaan kuorman aiheuttamaa välkyntää. Viiveistä puhuttaessa on kuitenkin muistettava, että tyristoriventtiilien ominaisuudet tuovat oman hitautensa SVC:n kompensointiin, eikä välkynnän kompensoinnissa ole siis edes mahdollista päästä tiettyä teoreettista arvoa parempaan tulokseen. Säättöjärjestelmällä pyritäänkin pääsemään mahdollisimman lähelle tätä tyristoriventtiilien määräämää rajaa. Säättöjärjestelmän rakennetta ja toiminnallisuutta tarkastellaan enemmän luvussa neljä.

Tyristoriventtiilien ohjaus ja valvonta on sijoitettu ohjauskaappiin, joka sisältää vaihevälikohtaiset tyristoriventtiilien ohjausyksiköt, jotka jakavat säättöjärjestelmältä tulevat sytytyspulssiohjeet tyristoreille. Ohjausyksiköt sisältävät myös joitakin tyristorien suojaustoimintoja, kuten esimerkiksi tyristorien ylijännitesuojauksen, joka pakkoliipaisee ylijännitteen ilmetessä tyristoriventtiilit johtavaan tilaan tyristorien tuhoutumisen estämiseksi. Häiriöiden eliminoimiseksi tyristorien ohjausyksiköiden ja säättöjärjestelmän sekä ohjausyksiköiden ja tyristoriventtiilien välinen kommunikointi tapahtuu optisesti. Tyristoriventtiilien ja ohjausyksiköiden välillä optisella yhteydellä saadaan myös erotettua sähköisesti venttiilit ja ohjausyksiköt toisistaan. [8]

Suojausjärjestelmän tehtävänä on suojata SVC-laitteistoa. Suojausjärjestelmä on sijoitettu omaan kaappiinsa, joka sisältää suojareleet ja tarvittavat apureleet. Jokaiselle suodatinparistolle sekä TCR:lle on omat suojareleensä. Lisäksi SVC:n yli- ja alijännitteen valvontaan on yksi rele. Edellisen alaluvun kuvassa 2.1 esitetyllä SVC:llä suojareleitä olisi siis viisi, joista TCR:n ja toisen suodatinpariston releet ohjaisivat samaa katkaisijaa, kolmannen ja neljännen suodatinpariston releet ohjaisivat molemmat omaa katkaisijaansa ja jännitettä valvova rele ohjaisi kaikkia näitä kolmea katkaisijaa. Suojareleet lähettävät laukaisukäskyt suoraan katkaisijoille, mutta releiden signaalit siirretään myös säättöjärjestelmään I/O-väylän välityksellä. Releen laukaisun jälkeen laukaisukäsky tulee kuitata käsin, ennen kuin SVC voi jatkaa toimintaansa. Releiden antamat laukaisut, havahtumiset ja hälytykset siirtyvät SVC:n hälytyslistaan. [8]

Releiden asettelut tehdään komponenttikohtaisten ominaisuuksien mukaan. TCR:n osalta releiden ylivirta-asettelut tehdään joko kelojen tai tyristorien mukaan, riippuen siitä kumman virtakestoisuus on pienempi. Ylivirtasuojauksessa käytetään sekä ylivirta-että oikosulkusuojaa. Releiden asetteluissa on huomioitava, että joskus TCR mitoitetaan siten, että sitä voidaan ajaa termisen mallin perusteella myös ylikuormalla. Tällöin hetkellinen ylikuormitus ei saa aiheuttaa vielä laukaisua. [8]

Myös suodatinparistoilla on ylivirta- ja oikosulkusuojat, joiden lisäksi paristoilla on laukaisut nollavirrasta. Nollavirtalaukaisua käytetään paristojen epäsymmetrian havaitsemiseen. Suodatinparistot ovat kytketty kaksoistähteen, jolloin normaalitilanteessa nollavirtaa ei kulje paristojen tähtipisteiden välillä. Vikatilanteessa kondensaattorien symmetrinen kytkentä häiriintyy ja tämä näkyy tähtipisteiden välisenä nollavirtana. Toi-

sen yliaallon suodatinparistossa on suojaus myös vaimennusvastusten ylivirran varalle. Vaimennusvastukset näkyvät toisen yliaallon suodatinpariston yhteydessä kuvassa 2.1. [8]

SVC suojataan myös yli- ja alijännitteiden varalta. Alijännitelaukaisun tarkoitus on estää suodatinparistojen kytkentä, mikäli laitteistolta katoaa jännite. Sama jännitevalvontarele sisältää myös maasulkusuojauksen, joka toteutetaan mittaamalla päämuuntajan toision nollajännitettä avokolmioon kytketyllä jännitemuuntajalla. [8]

2.3. Jäähdytysjärjestelmä

SVC:n jäähdytysjärjestelmän tehtävä on jäähdyttää tyristoreita. Tyristoreissa syntyvät johtotilan häviöt nostavat tyristorien lämpötilaa ja tämän vuoksi niitä on jäähdytettävä, jotta niiden lämpötila ei nouse haitallisen suureksi. Jäähdytysjärjestelmä koostuu pumpuista, säiliöistä, lämmönvaihtimesta, ioninvaihtimesta, suodattimista ja putkistoista. Jäähdytyksessä käytetään deionisoitua vettä, jota kierrätetään tyristoriyksiköiden ja lämmönvaihtimien kautta. [8]

Jäähdytysjärjestelmää ohjaa oma ohjelmoitava logiikka, joka on väylän välityksellä yhteydessä SVC:n säätöjärjestelmään. SVC:n säätöjärjestelmästä tulee käynnistys- ja pysäytyskäskyt jäähdytysjärjestelmälle ja jäähdytysjärjestelmästä taas tulee käyntitieto ja hälytykset SVC:n säätöjärjestelmään. Jäähdytysjärjestelmästä mitataan veden virtaus, lämpötila, paine, johtavuus ja vesisäiliöiden pinta. Logiikka säätaa jäähdytystehon sopivaksi veden virtauksen, lämpötilan ja paineen perusteella. Veden johtavuuden ja vesisäiliöiden pinnan perusteella sen sijaan tehdään päätelmiä jäähdytysjärjestelmän toimintakunnosta. [8]

3. SVC:N KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

SVC:tä käytetään teollisuudessa loistehon kompensointiin, välkynnän vaimentamiseen ja kuormituksen balansointiin ja tyypillisimpinä asennuskohteina ovat terästeollisuuden valokaariuunit, senkkauunit ja valssilaitokset. Valokaari- ja senkkauunien tapauksessa SVC:llä pyritään vaimentamaan kuorman aiheuttamaa välkyntää, koska sulatusprosessin aikana uunien kuormitusvirrat vaihtelevat hyvin voimakkaasti, mikä näkyy verkon jännitteissä välkyntänä. Valssilaitoksilla kuormavirta ei vaihtelee niin nopeasti kuin uunien yhteydessä, mutta suuret kuormat vaativat kuitenkin loistehon kompensointia, jotta jännite pysyisi nimellisessä arvossaan. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan tarkemmin teollisuus-SVC:n vaikutuksia sähköverkkoon ja muuhun ympäristöön.

3.1. Loistehon kompensointi

SVC:n yksi tärkeimmistä tehtävistä on loistehon kompensointi. Kuorman tyypistä riippumatta SVC:llä pyritään kompensoimaan kuorman kuluttama loisteho, jotta sitä ei tarvitse ottaa verkosta. Teollisuudella on taloudellisia motiiveja loistehon kompensointiin, sillä loistehon paikallisella kompensoinnilla vältytään sähköverkkoyhtiöiden loistehomaksuilta. Tehtaissa säästetään myös kaapeleiden ja keskusten mitoituksessa, kun loistehoa ei siirretä niiden läpi. Sähköverkkoyhtiöiden kannalta loistehon paikallinen kompensointi poistaa loistehon siirrosta aiheutuneet häviöt, vapauttaa verkon kapasiteettia pätötehon siirrolle sekä pienentää verkon jännitteen alenemaa. Näin loistehon paikallisesta kompensoinnista syntyy taloudellista hyötyä myös sähköverkkoyhtiölle. [9]

Loisteho on puhtaasti sähkötekkinen suure, joka kuvaa sähkölaitteen aiheuttamaa vaihekulmaeroa jännitteen ja virran välille. Loistehoa esiintyy vain vaihtosähköverkoissa, eikä sitä voi olla tasasähköverkoissa. Loistehoa syntyy sähköverkkoon, kun siihen on kytketty tai kytkeytyneenä reaktiivinen komponentti, eli kela tai kondensaattori. Ainoastaan ideaalinen sähköpiiri voi olla puhtaasti resistiivinen, sillä jo sähköjohdot itsessään tuottavat tai kuluttavat loistehoa. Yleisimmin kuormitukset kuluttavat loistehoa, eli ovat induktiivisia, joista esimerkkeinä voidaan mainita muuntajat ja sähkömoottorit. Puhtaasti induktiivisen kuormituksen läpi kulkeva virran vaihekulma on 90° jännitteen vaihekulmaa jäljessä. Loistehoa tuottavia, eli kapasitiivisia kuormia ovat esimerkiksi kondensaattori ja ylimagnetoitu tahtimoottori. Puhtaan kapasitiivisen kuorman virran vaihekulma on 90° jännitteen vaihekulmaa edellä. Loisteho voidaan laskea jännitteen ja virran perusaaltojen tehollisarvojen sekä niiden välisen vaihekulman avulla yhtälön (6) mukaisesti:

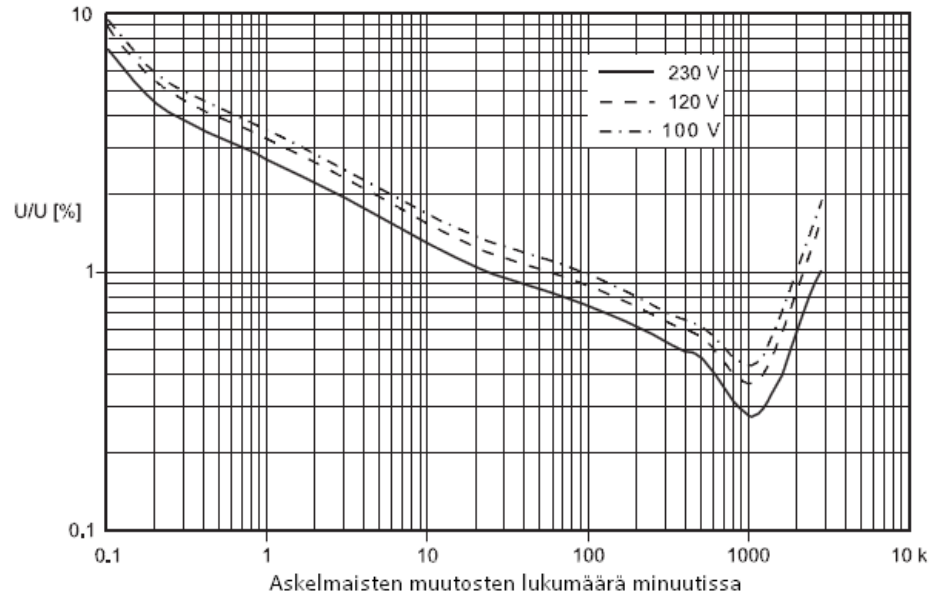
$$Q = U_{50\text{Hz}} I_{50\text{Hz}} \sin \varphi_{50\text{Hz}} \cdot \quad (6)$$

Loisteho vaikuttaa paikallisesti myös jännitteen suuruuteen. Suuri loistehokuorma aiheuttaa verkon impedansseissa jännitehäviöitä, ja loistehokuorman liityntäpisteessä jännite joko pienenee tai suurenee loistehokuorman tyypistä riippuen. Mikäli loistehokuorma on induktiivinen, on sen jännite verkkoa syöttävän jännitelähteen jännitettä alhaisempi. Mikäli loistehokuorma on kapasitiivinen, on kuorman jännite suurempi kuin verkkoa syöttävän jännitelähteen. Tähän perustuen loistehon kompensoinnilla voidaan vaikuttaa paikallisesti myös jännitteen suuruuteen. [9]

3.2. Välkynnän vaimennus

Välkynnän vaimennus on SVC:n tärkein tehtävä kompensoitaessa aikaisemmin mainittuja valokaari- ja senkkauuneja. Sähköverkkoyhtiöt asettavat terästehtaille vaatimuksia välkynnän kompensoinnista, sillä ilman kompensointia valokaari- ja senkkauunien aiheuttama häiriö voi verkon rakenteesta ja jäykkyydestä riippuen näkyä hyvinkin laajalla alueella. Välkyntä on suurinta heikossa verkossa, eli verkossa, jonka impedanssi on suuri sulatusuunin nimellisvirtaan nähden. Tällöin kuormavirran muutokset näkyvät verkossa suurempina jännitteen muutoksina. Verkon rakenne vaikuttaa häiriöiden leviämiseen, sillä häiriöt ovat suurimmillaan asiakkailta, jotka ovat saman johtolähdön varrella kuin häiriön lähde. Yleensä kuitenkin esimerkiksi terästehtaat sijoitetaan omalle johtolähdölle juuri välkynnän ja muiden häiriöiden leviämisen minimoimiseksi.

Välkyntä tarkoittaa toistuvia nopeita jännitemuutoksia, mitkä voidaan havaita muun muassa valojen välkyntänä tai herkkien kuormien häiriintymisenä. Valojen välkynnän aiheuttama häiritsevyys riippuu jännitevaihteluiden suuruudesta, kestoajasta ja taajuudesta. Ihmissilmä on herkimmillään valossa näkyvälle noin 10 Hz:n taajuudella esiintyvälle välkynnälle, jolloin pienetkin jännitteen amplitudin muutokset näkyvät häiritseväinä. Kuvassa 3.1. on esitetty ihmisen keskimääräinen välkynnän havaitsemiskynnys jännitetasen muutoksen ja minuutissa tapahtuvien muutosten lukumäärän funktiona. Käyrän alapuolella esiintyvää välkyntää suurin osa ihmisistä ei havaitse. Käyrän yläpuolella välkyntä on havaittavissa suurimman osan mielestä. Esimerkiksi 230 voltin jännitteellä ihmissilmä on herkimmillään noin 8,3 Hz:n taajuudella tapahtuvalle välkynnälle. Tällä taajuudella jo alle 0,3 % välkyntä nimellisjännitteessä on havaittavaa. Kuvaajan aineisto on kerätty tutkimuksissa, joissa valitulle joukolle ihmisiä näytettiin eri amplitudilla ja taajuudella välkkyviä valoja. Käyrät on määritelty siten ihmisten subjektiivisten kokemusten pohjalta. [10]



Kuva 3.1. Ihmisen keskimääräinen välkynnän havaitsemiskynnys jännitetason muutoksen ja minuutin aikana tapahtuvien askelmaisten muutosten lukumäärän funktiona. [2]

Välkyntää voidaan mitata välkyntämittareilla, jotka määrittävät 10 minuutin mittausjaksolta välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin P_{st} . Lyhytaikaisten häiritsevyysindeksien avulla voidaan laskea välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksi

$$P_{lt} = \left[\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12} \right]^{1/3}. \quad (7)$$

Molemmat häiritsevyysindeksit kuvaavat valaistuksen välkynnän häiritsevyyttä ihmisten kannalta. Häiritsevyysindekseille on määritelty laatukriteerit ja raja-arvot standardissa SFS EN-50160. Standardin mukaan esimerkiksi pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin tulee normaaleissa käyttötilanteissa olla 95 % ajasta $P_{lt} \leq 1$. Välkyntämittareiden suunnittelu ja toiminta on myös kirjattu erilliseen standardiin IEC 61000-4-15. Tarkemmin välkyntämittareiden rakenteesta ja toiminnasta on kerrottu lähteessä [10].

3.3. Kuorman balansointi

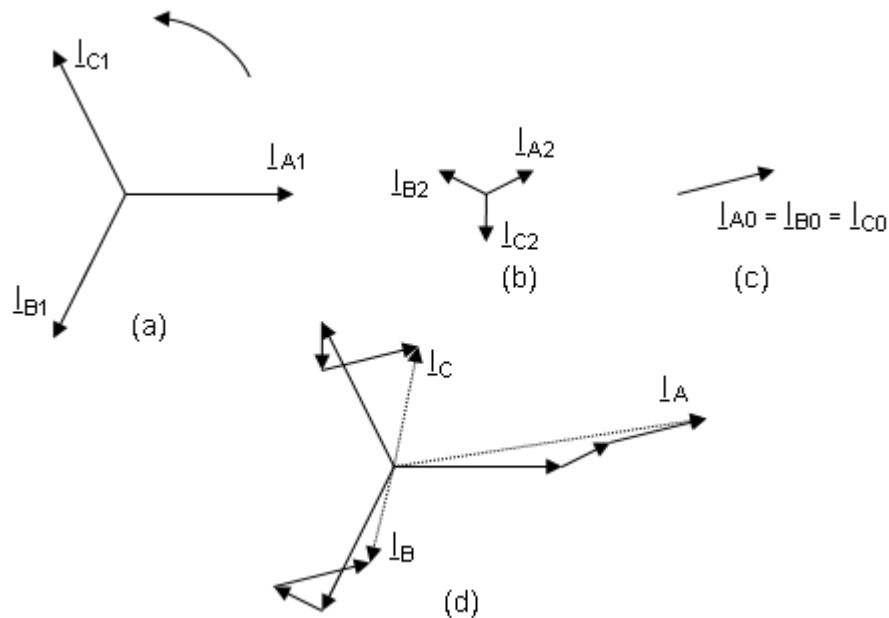
Yksi teollisuus-SVC:n tehtävä on kolmivaiheisen kuormituksen balansointi, mikäli kuormituksessa esiintyy epäsymmetriaa. Valokaariuuni on hyvin tyypillinen kuorma, jossa kuormavirroissa ilmenee hyvin voimakasta epäsymmetriaa. Hetkittäin valokaariuunissa voi olla jopa kahden vaiheen välinen oikosulku kolmannen vaiheen virran ollessa nollassa. Kuormavirtojen epäsymmetrian balansointi on toivottavaa, sillä epäsymmetriset virrat aiheuttavat lisärasitusta sähköverkon generaattoreille. Epäsymmetriset kuormitusvirrat synnyttävät myös jännite-epäsymmetriaa verkon impedanssien läpi kulkiesaan.

Sähköverkon jännitteiden ja virtojen epäsymmetrian laskemiseksi käytetään symmetrisiä komponentteja. Symmetriset komponentit ovat matemaattinen tapa, jolla epäsymmetriset sinimuotoiset kolmivaihesuureet voidaan esittää kolmen symmetrisen kolmivaiheisen komponentin summana. Näitä komponentteja kutsutaan myötä-, vasta-, ja nollakomponenteiksi, joista jokainen käsittää kolme osoitinta. Symmetrisissä kolmivaihesuureissa esiintyy ainoastaan myötäkomponenttia, joten epäsymmetriset kolmivaihesuureet voidaan balansoida kompensoimalla suureissa esiintyvä vasta- ja nollakomponentti.

Myötäkomponentissa osoittimet ovat ideaalisen generaattorin synnyttämän jännitteen mukaisia, eli vaihesuureet ovat amplitudiltaan yhtä suuria, niiden välillä on 120° vaihesiirto, vaihejärjestys on normaalin sähköverkon jännitteen mukainen ja niitä vastaavien hetkellisarvo-osoittimien pyörimissuunta on vastapäivään.

Vastajärjestelmässä on niin ikään kolme, amplitudiltaan yhtä suurta, vaiheosoitinta 120° :n vaihesiirroissa keskenään. Erona myötäjärjestelmään on pyörimissuunta, sillä vastajärjestelmän osoittimet pyörivät myötäpäivään, mikäli vaihejärjestys on sama kuin myötäjärjestelmässä. Toinen tapa mallintaa vastajärjestelmä on vaihtaa toisen ja kolmannen vaiheen vaihejärjestystä, kuten kuvassa 3.2, ja pitää osoittimien pyörimissuunta samana kuin myötäjärjestelmässä. Kummallakin tavalla lopputulos on sama.

Nollajärjestelmä koostuu kolmesta osoittimesta, joilla sekä amplitudi että kulma ovat yhteneviä, eli käytännössä nollajärjestelmässä on kolme samaa osoitinta. Symmetrisiä komponentteja ja niistä muodostuvia vaihesuureita on havainnollistettu kuvassa 3.2. Kuvassa kaikkien komponenttien pyörimissuunta on vastapäivään. [11]



Kuva 3.2. (a) Myötäjärjestelmä, (b) vastajärjestelmä, (c) nollajärjestelmä ja (d) varsinaisten vaihesuureiden (katkoviivalla) muodostuminen symmetrisistä komponenteista.

Symmetriset komponentit saadaan laskettua vaihesuureiden osoittimista muunnosmatriisiin (8) avulla. Matriisissa \underline{a} on vaiheenkääntöoperaattori $\underline{a} = 1\angle 120^\circ$.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Yhtälössä muunnos on tehty virroille, mutta muunnos voidaan tehdä vastaavasti jännitteille. Muunnos antaa symmetristen komponenttien osoittimet a-vaiheen osalta. Esimerkiksi vastakomponentin b-vaiheen osoitin saadaan kertomalla a-vaiheen osoitin vaiheenkääntöoperaattorilla ja c-vaiheen osoitin kertomalla a-vaiheen osoitin vaiheenkääntöoperaattorin neliöllä. Myötä- ja nollakomponentin b- ja c-vaiheen osoittimet saadaan myös vaiheenkääntöoperaattoria käyttäen kuvan 3.2 mukaisesti. [11]

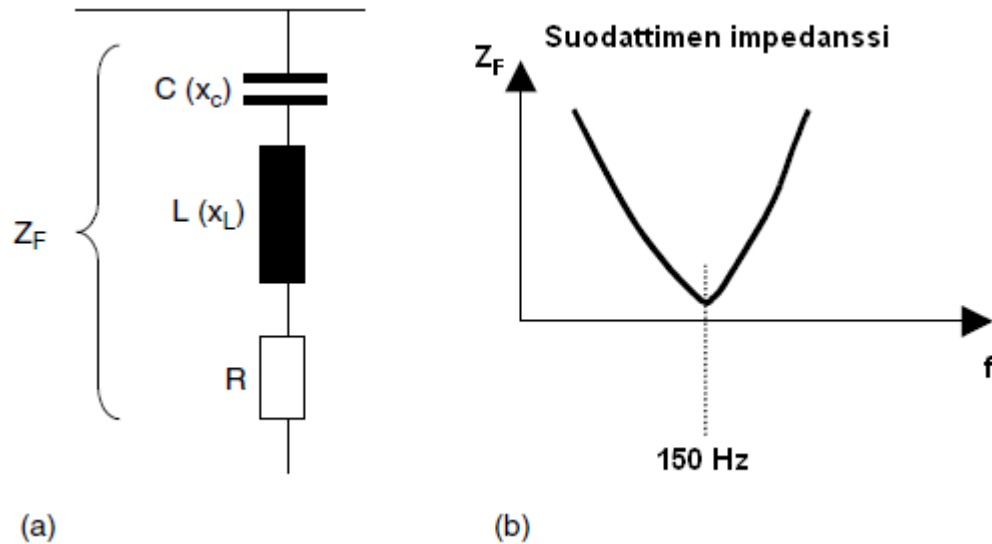
3.4. Harmonisten yliaaltojen suodattaminen

Harmoniset yliaallot ovat komponentteja, joiden taajuudet ovat perusaallon kokonaislukumukerrannaisia. Harmonisia yliaaltoja esiintyy sähköverkossa sekä jännitteissä että virroissa. Harmonisia yliaaltoja syntyy verkkoon, kun jonkin siihen kytketyn laitteen ottama virta ei ole symmetristä siniaaltoa. Esimerkkeinä tällaisista kuormista ovat tasa- ja vaihtosuuntaajat, purkauslamput ja yleensäkin tehoelektroniikka sisältävät laitteet. Valokaariuuni on myös suuri harmonisten yliaaltojen lähde. Yliaaltoja voidaan tarkastella Fourier'n analyysin avulla, jonka mukaan jokaisen jaksollisen signaalin voidaan ajatella muodostuvan useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaalista. Fourier'n analyysin avulla nämä sinimuotoiset signaalit voidaan erotella jaksollisesta ei-sinimuotoisesta signaalista ja niiden perusteella muodostaa yliaaltospektri. Yliaaltospektristä nähdään, millä taajuudella yliaaltoja esiintyy ja suunnitella sen perusteella suodattimet yliaaltojen suodatukseen.

Yliaaltosuodattimien ideana on luoda yliaaltotaajuisille virroille matalaimpedanssinen maadoittumisreitti, jolloin ne suodattuvat pois sähköverkosta. SVC:ssä käytetään yleensä kaistanpäästösuodattimia, jotka voivat olla viritetty yhdelle tai kahdelle taajuudelle. Suotimen ollessa viritettynä yhdelle taajuudelle puhutaan yksittäisviritetystä suodattimesta ja kahdelle taajuudelle viritettynä kaksoisviritetystä suodattimesta. Suodattimia ei viritetä täsmälleen yliaaltotaajuudelle, vaan hieman kyseistä yliaaltotaajuutta suuremmalle tai pienemmälle taajuudelle. Tällä vältetään mahdollinen verkon ja suodatimen välinen resonanssi yliaaltotaajuudella. Joskus voidaan käyttää myös ylipäästösuoatinta, jolloin suodattimella pyritään päästämään läpi kaikki tiettyä rajataajuutta korkeammat taajuudet. Näiden suodattimien sopivilla yhdistelmillä virroista saadaan poistettua haitallisimpia yliaaltoja.

Kuvassa 3.3 (a) on esitetty yksittäisviritetyn kaistanpäästösuoatimen periaatekuva. Kuvasta nähdään, että suodatin sisältää sekä induktiivista että kapasitiivista reaktanssia. SVC:n tapauksessa suodattimilla myös tuotetaan loistehoa, eli suodatimen kondensaattori mitoitetaan tuottamaan 50 Hz:n taajuudella huomattavasti enemmän loistehoa kuin

suodattimen kela kuluttaa. Kuvassa 3.3 (b) on esitetty suodattimen impedanssi taajuuden funktiona. Kyseinen suodatin on viritetty kolmannelle yliaallolle, jonka taajuudella suodattimen impedanssi on pienimmillään. [5], [12]



Kuva 3.3. (a) Kaistanpäästösuodattimen periaatekuva ja (b) kaistanpäästösuodattimen impedanssi taajuuden funktiona. Suodatin on viritetty kolmannelle yliaallolle. [12]

Suodattimien viritys perustuu sarjaresonanssipiiriin muodostamiseen. Resonanssitaajuudella suodattimen reaktanssi on nolla ja suodattimen impedanssi on resistiivinen. Resistanssi kuvaa tässä tapauksessa suodattimen resistiivisiä häviöitä. Kuvassa 3.3 (b) resistiivinen osuus suodattimen impedanssista näkyy 150 hertsin kohdalla. Hyvällä suodattimella resonanssitaajuuden impedanssi on mahdollisimman pieni, mutta muilla taajuuksilla impedanssi on suuri. Tällöin perustaajuudella syntyvät häviöt suodattimessa jäävät mahdollisimman pieniksi. Suodattimen suunnittelu matalataajuisille yliaalloille onkin haastavaa, sillä tällöin resonanssitaajuuden tulee olla lähellä virran perustaajuutta. Suodattimien suunnittelua on käsitelty tarkemmin lähteissä [12] ja [13].

3.5. SVC:n jalanjälki

SVC:n jalanjäljellä tarkoitetaan SVC:n fyysistä tilantarvetta. Fyysisen tilantarpeen määrää laitteiden fyysinen koko, sähkötekniset rajoitukset sekä magneettikentistä aiheutuvat rajoitteet. Käytännön toteutuksissa tilantarve pyritään aina minimoimaan, joten edellä mainittujen tekijöiden tarkastelu on taloudellisista syistä järkevää.

Sähköteknisesti laitteet sijoitetaan vähintään vaadittujen eristysvaatimusten edellyttämälle etäisyydelle toisistaan. IEC on antanut ohjeistuksen suurjännitelaitteiden eristystäisyyksistä eri tilanteissa. Projektitoimituksissa voidaan käyttää myös asiakkaan antamaa ohjeistusta eristystäisyyksistä. Suurjännitelaitteistoon kuuluvia osia sijaitsee

sisä- ja ulkotiloissa, joten eristysvälien mitoittaminen vaikuttaa myös rakennusten suunnitteluun. Suurjännitelaitteistosta tyristorit sijaitsevat aina sisätiloissa, kun taas suodatinparistot ja TCR-kelat voivat sijaita tilanteesta riippuen joko sisä- tai ulkotiloissa. [14]

Terveydellisistä syistä myös magneettikentille altistukselle on annettu raja-arvot, joita ei tulisi ylittää. Raja-arvot on annettu sekä satunnaiselle että jatkuvalle altistukselle. Esimerkiksi 50 Hz:n taajuiselle magneettikentälle jatkuvan altistuksen yläraja on 100 μT ja satunnaisen altistumisen yläraja on 500 μT . SVC:n suunnittelussa myös nämä raja-arvot tulee ottaa huomioon. [15], [16]

Johtimessa kulkeva sähkövirta aiheuttaa ympärilleen magneettikentän. Vaihtovirran tapauksessa magneettikenttä muuttuu sähkövirran mukaisesti samalla taajuudella. SVC:ssä suurimmat magneettikentän voimakkuudet esiintyvät TCR-kelojen ympäristössä. Myös tyristorit ja suurjännitekomponenttien väliset kiskot ovat merkittäviä lähteitä. Magneettikentän voimakkuuden altistumisraja-arvojen ylittyminen vältetään estämällä ihmisten pääsy tiloihin, joissa kyseiset raja-arvot ylittyvät. Estäminen voidaan toteuttaa esimerkiksi aitaamalla alue. [16]

4. TEOLLISUUS-SVC:N SÄÄTÖJÄRJESTELMÄ

Teollisuus-SVC:n säätöjärjestelmä sisältää toiminnallisuuden, jolla mittamuuntajien mittaussignaalien perusteella saadaan muodostettua tyristoriventtiilien liipaisuohjeet. Alstom Grid Oy:ssä käytetään NDC-järjestelmää, jonka rakennetta ja toiminnallisuutta käydään läpi seuraavissa alaluvuissa.

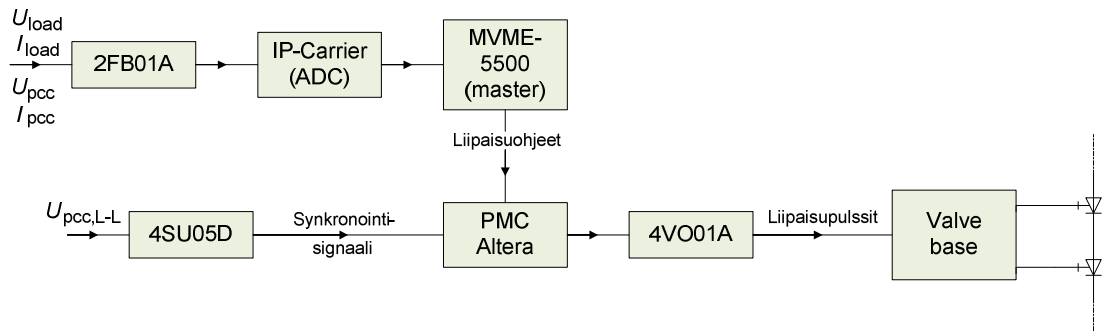
4.1. Säätöjärjestelmän rakenne

NDC-järjestelmä pohjautuu VME-väylään (engl. Versa Memory Eurocard), johon on liitetty prosessorikortteja, joissa säätöohjelmaa ajetaan. Tämän lisäksi järjestelmä sisältää piirikortteja, jotka tarjoavat erilaisia toiminnallisuuksia. Käyttöliittymä säätöjärjestelmään on toteutettu säätöjärjestelmän kaappiin liitetyllä HMI-tietokoneella sekä kaukokäyttöliittymällä.

Kuvassa 4.1 on esitetty NDC -järjestelmällä toteutettu teollisuus SVC:n VME-laitteisto. VME-väylään liitetään normaalisti kolme Motorolan MVME5500-prosessorikorttia, jotka ovat kuvassa virtalähteestä (kuvassa 4.1 VME Power Supply) seuraavina. Kaikkiin kortteihin on asennettu VxWorks-reaaliaikakäyttöjärjestelmä, ja sen lisäksi näistä Master- ja Slave-korteille (kuvassa 4.1 ensimmäinen ja toinen kortti vasemmalta) on asennettu omat PLC-ohjelmansa (engl. Programmable Logic Controller), jotka määrittävät SVC:n toiminnallisuuden. Master-kortin pääasiallisena tehtävänä on tarvittavien TCR:n liipaisukulmien määrittäminen, eli se suorittaa varsinaisen loisteholaskennan. Slave-kortti huolehtii SVC:n logiikkatoiminnoista, kuten katkaisijoiden ohjauksista, hälytyksistä ja laukaisuista. Kolmas prosessorikortti, CMI-kortti (engl. Communication and Maintenance Interface), huolehtii kommunikoinnin HMI:n ja VME:n välillä. CMI-kortille tallennetaan myös Master- ja Slave-korttien PLC-ohjelmat, josta ne voidaan hakea, mikäli VME-räkki resetoidaan. Itse CMI-kortti ei tarvitse mitään muuta ohjelmaa käyttöjärjestelmän lisäksi. [8], [17]

Jokaisessa VME-prosessorikortissa on kaksi PMC-paikkaa, joihin voidaan liittää PMC-väylään sopivia laitteita. Master-kortilla PMC 1 -paikassa on PMC Altera, jonka välityksellä Master-kortti lähettää määrittämänsä TCR:n liipaisupulssit eteenpäin. Liipaisupulssien siirto on toteutettu PMC Alteralla, sillä se tarjoaa nopeamman tiedonsiirtoväylän kuin CMI-kortti. Master-kortin toisessa PMC-paikassa on yleensä DA-muunnin TPMC550, jonka välityksellä saadaan tarkasteltua Master-kortin sisäisiä muuttujia jännitesignaaleina. DA-muunninta käytetään lähinnä testaukseen ja vikojen selvittelyyn. Slave-kortilla PMC-paikoissa on Interbus Master -kortit, jotka tarjoavat yhteyden VME-väylän ja SVC:n kenttälaitteiden välille. SVC:n kenttäsignaaliointi on toteutet-

likaaviolla. Mittasignaalit U_{pcc} , I_{pcc} , U_{load} , I_{load} ja $U_{pcc,L-L}$ saadaan mittamuuntajilta. [8], [17]



Kuva 4.2. Signaaliakaavio SVC:n säädöstä.

4.2. Säättöjärjestelmän toiminnallisuus

Teollisuus-SVC:n tehtävä on kuorman loistehon kompensointi ja PCC:n jännitteen staabiilina pitäminen. Loistehon kompensoinnilla vaimennetaan kuormituksen aiheuttamaa välkyntää, eli kuorman muutoksiin tulee reagoida nopeasti. Loistehon kompensoinnissa kuorman muutoksiin pitää myös reagoida vaihekohtaisesti, sillä tarkoituksena on kompensoida myös kuormituksen epäsymmetriaa. Jännitteen stabiloinnilla sen sijaan tarkoitetaan jännitteen pitkäaikaisen keskiarvon pitämistä lähellä nimellisarvoaan. Tämä tarkoittaa, että stabiloinnin aikaikkuna on huomattavasti välkynnän kompensointia pidempi. Näiden kahden säättövaatimuksen toteuttaminen yhdellä säättöpiirillä on hankalaa, joten NDC-järjestelmässä säättömalli on jaettu kahteen osaan: avoimeen säätöön ja takaisinkytkettyyn säätöön. Avoimella säädöllä kompensoidaan välkyntää ja takaisinkytketyllä säädöllä pyritään pitämään PCC:n jännite nimellisessään.

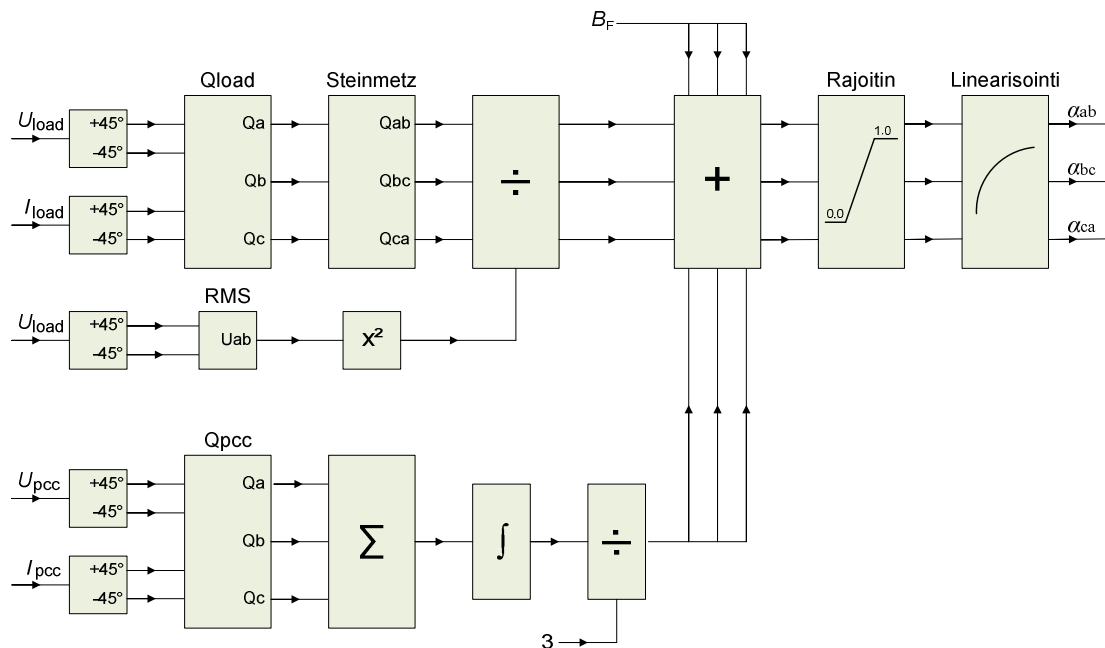
Näiden kahden säättövaatimuksen lisäksi SVC:ssä on mittauksia ja ohjauksia, jotka eivät ole niin aikakriittisiä kuin välkynnän kompensointi. Tällaisten toimintojen suorittaminen samalla suoritussyklillä varsinaisen säädön kanssa ei ole järkevää eikä taloudellista, sillä yksi prosessori pystyy suorittamaan rajallisen määrän toimintoja yhden suoritussyklin aikana. Parempi tapa on jakaa prosessorin komentoja suoritettavaksi eri aikatasoilla. Näin hitaampi komento suoritetaan joka kymmenes tai sadas suoritussykli ja prosessorin reserviä vapautuu nopeampien komentojen tarpeisiin. [17]

NDC:ssä säättöohjelma on jaettu $100\ \mu s$, $1\ ms$, $10\ ms$ ja $100\ ms$ aikatasoihin. Eli $100\ \mu s$ aikatasolla ohjelma suorittaa kaikki toiminnot $100\ \mu s$ välein. Säättötoiminnot sijoitetaan ohjelmaan eri aikatasoille niiden reaaliaikavaatimusten mukaisesti. Esimerkiksi välkynnän kompensointiin käytettävä laskenta suoritetaan $100\ \mu s$ aikatasolla. Jännitteen tehollisarvon mittaaminen ja näyttö HMI:lle sen sijaan suoritetaan $100\ ms$ aikatasolla. Teollisuus-SVC:n tapauksissa varsinainen säättöohjelmisto pyörii yleensä kokonaisuudessaan $100\ \mu s$ aikatasolla, mutta HMI:lle menevät mittaukset suoritetaan hitaammalla aikatasolla. Verkosto-SVC:n tapauksessa myös varsinainen säättöohjelmisto

pitää jakaa eri aikatasoille, sillä muuten sitä ei ehdittäisi kokonaisuudessaan suorittaa $100\ \mu\text{s}$ syklin aikana.

Säätöohjelmat kirjoitetaan Nokian Capacitors Oy:n kehittämällä NDC-kielillä. NDC-kieli pohjautuu standardiin ”IEC-61131-1, Programmable controllers – Part 3: Programming languages”. Kieli sisältää normaalit loogiset ja matemaattiset operaatiot, mutta näiden lisäksi erilaisia SVC:n tarkoituksiin rakennettuja toimilohkoja, joista esimerkkeinä voidaan mainita vaihelukittu silmukka tai sinimuotoisten suureiden tehollisarvon laskenta. SVC:n säätöjärjestelmä kasataan yhdistelemällä näitä toimilohkoja ja jaotteleamalla ne järkeviksi kokonaisuuksiksi. Ohjelman kirjoittamisen jälkeen ohjelma käännetään NDC-kieltä varten kehitetyllä kääntäjällä prosessorikorteilla ajettavaksi ohjelmaksi ja siirretään VME-räkin prosessorikorteille. Ohjelmointi, kääntäminen ja ohjelman lataus prosessorikorteille tapahtuvat PC-tietokoneella. [8], [17]

Teollisuus-SVC:n säätösovelluksen yksinkertaistettu lohkokaavio on esitetty kuvassa 4.3. Ylempi osa lohkokaaviosta on avointa säätöä ja alempi osa takaisinkytkettyä. Molempien säätöjen laskemat susceptanssiohjeet summataan ja viedään rajoittimen kautta linearisointirampille, jossa susceptanssiohjeet muutetaan sytytyskulmaohjeiksi. Sytytyskulmaohjeet välitetään sitten Alteran välityksellä tyristoriventtiilien ohjauskaapille ja sieltä tyristoreille.



Kuva 4.3. Yksinkertaistettu lohkokaavio teollisuus-SVC:n vaihekääntöön perustuvasta säätösovelluksesta.

Säätöpiirille tulevat mittaukset saadaan sekä suurjännite että keskijännitekiskostoon liitetyiltä mittamuuntajilta. Avoimen säätöön tarvitaan kuorman virta- ja jännitesignaali ja PCC:n mittauksia käytetään suljetun säädön laskentaan. Seuraavissa alaluvuissa käydään tarkemmin läpi säädön eri vaiheita.

4.2.1. Avoin säätö

Avointa säätöä käytetään kuorman aiheuttaman välkyynnän vaimentamiseen. Avoin säätö toteutetaan laskennalla, jossa sen hetkistä kuorman virroista ja jännitteistä lasketaan kuorman vaihekohtainen hetkellinen loisteho. Laskettu loistehoarvo jaetaan tämän jälkeen SVC:n jännitteen neliöllä, jolloin loisteho saadaan muunnettua susceptanssiarvoksi. Tällä toimenpiteellä saadaan myös eliminointia kiskoston jännitteen vaihtelun vaikutus säädön lopputulokseen. Tämän jälkeen susceptanssiohje summataan takaisinkytketyn säädön susceptanssiohjeeseen ja saadaan lopullinen susceptanssiohje, jonka perusteella tyristorien liipaisuohjeet muodostetaan. [8]

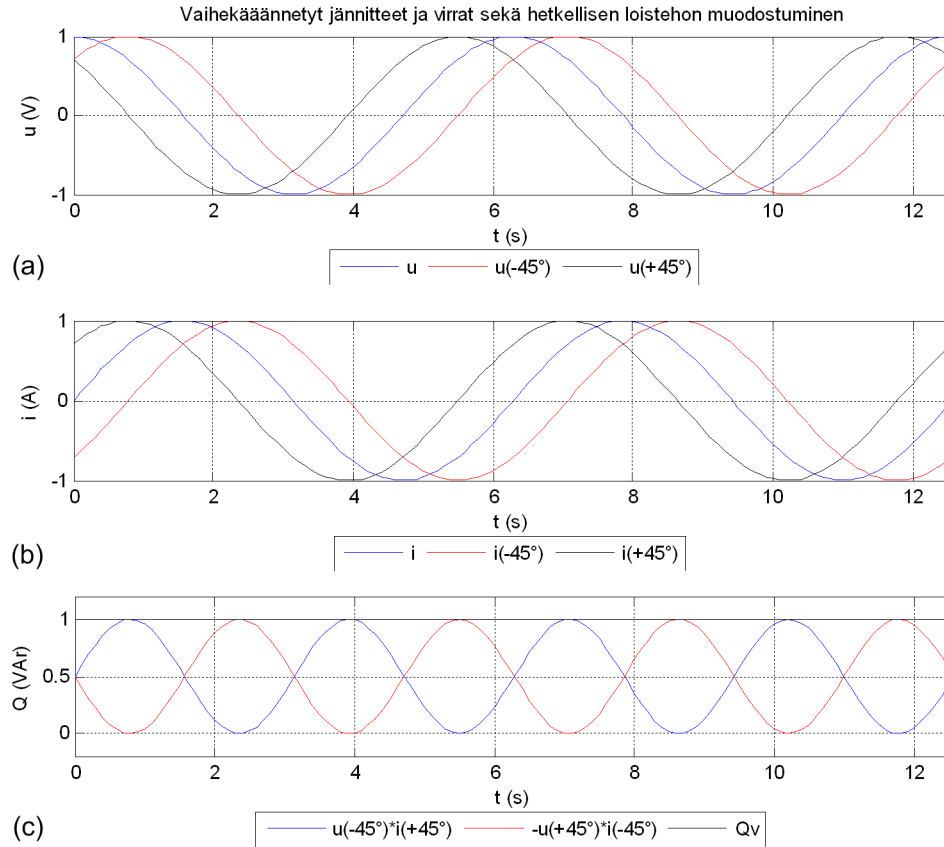
Kuorman vaihekohtaista loistehon laskentaa ei voida suorittaa tavanomaisin keinoin jännitteen ja virran tehollisarvoja käyttäen, sillä tehollisarvot eivät sovi jatkuvasti muuttuvan tilanteen laskentaan. Loistehon hetkellisarvon määrittämiseksi NDC-järjestelmässä käytetään virran ja jännitteen vaihekääntöön perustuvaa laskentaa. Vaihekääntöön perustuvassa laskennassa kuorman hetkellinen loisteho saadaan laskettua kuorman jännitteen ja virran $+45^\circ$ ja -45° vaihesiirrettyjen suureiden avulla. Yhden vaiheen hetkellinen loisteho saadaan laskettua seuraavasti [8]:

$$Q_v = \frac{1}{2}(\hat{U} * \hat{I} \sin \phi) = \frac{1}{2}(\hat{U} \sin(\omega t - \pi/4) * \hat{I} \sin(\omega t - \phi + \pi/4) - \hat{U} \sin(\omega t + \pi/4) * \hat{I} \sin(\omega t - \phi - \pi/4)). \quad (9)$$

Yhtälössä jännite \hat{U} ja virta \hat{I} tarkoittavat jännitteen ja virran huippuarvoja, vaihekulma ϕ kuvaa jännitteen ja virran välistä vaihekulmaa ja sin-lausekkeissa esiintyvä $\pi/4$ kuvaa 45° vaihesiirtoa.

Yhtälön (9) mukainen hetkellisen loistehon laskenta on havainnollistettu kuvassa 4.4. Siinä on esitetty jännitteen ja virran perusaallot sekä niiden molempien vaihekäännetyt signaalit, kun molempien sekä virran että jännitteen amplitudi on yksi ja niiden välinen vaihesiirto on 90° . Alimpana kuvassa on esitetty yhtälön (9) molemmat oikean puolen erotuslausekkeen termit sekä lausekkeen lopputuloksena saatava hetkellinen loisteho kyseisessä tilanteessa. Kuvaajasta nähdään, että edellä mainitussa tilanteessa yhtälön (9) oikea puoli pelkistyy sinin ja kosinin neliöiden summaksi, joka on yksi jokaisena ajanhetkenä.

NDC-järjestelmässä sekä 45° että -45° vaihekääntö toteutetaan yhdellä 45° vaihekääntöpiirillä, joka toteutetaan integroimalla signaalia. Vastakkainen -45° vaihesiirto saadaan aikaan vähentämällä 45° vaihekäännetty signaali alkuperäisestä signaalista. Vastakkainen -45° vaihekääntö olisi mahdollista toteuttaa myös derivoimalla, mutta tällöin sisääntulosignaali ei saisi sisältää juurikaan säröä. Tästä syystä teollisuus-SVC:ssä kahden signaalin erotus tuottaa paremman lopputuloksen. [8]



Kuva 4.4. Vaihekohtaisen loistehon laskenta vaihekääntöpiirillä. (a) Verkon vaihejännite ja vaihekäännetyt vaihejännitteet, (b) verkon vaihevirta ja vaihekäännetyt vaihevirrat sekä (c) yhtälön (9) oikean puolen erotuslausekkeen termit ja niistä muodostuva hetkellinen loisteho.

Vaihekäännön ja loisteholaskennan jälkeen saadut vaihekohtaiset loistehoarvot tulee muuttaa vielä vaihevälikohtaisiksi, sillä TCR on kytketty kolmioon. Vaihekohtaisten loistehoarvojen muunto vaihevälikohtaisiksi suoritetaan Steinmetzin muunnoksella, joka on esitetty matriisimuodossa yhtälössä (10) [8]:

$$\begin{bmatrix} Q_{AB} \\ Q_{BC} \\ Q_{CA} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Kuorman vaihekohtaisen loistehon laskennan jälkeen täytyy laskettu loisteho muuttaa susceptanssiksi jakamalla se SVC-kiskon pääjännitteen tehollisarvon neliöllä. Tehollisarvon määrittäminen perustuu niin ikään vaihekääntöön, jotta RMS-arvo saataisiin määritettyä riittävän nopeasti. Kiskoston jännitteen muutokset vaikuttavat suoraan SVC:n loistehon määrään, ja tämän vuoksi myös jännitteen mittauksen nopeus on tärkeää säädön kannalta. Itse jännitteen mittaus suoritetaan vaihejännitteistä, joista lasketaan pääjännite säätölogiikan sisällä. [8]

4.2.2. Takaisinkytketty säätö

Takaisinkytketyn säädön tarkoituksena ei ole kompensoida kuorman aiheuttamaa välkyntää, vaan tasata pitkäaikainen loistehon keskiarvo käyttäjän haluamalle tasolle. Takaisinkytketyllä säädöllä ei myöskään ole tarkoitus kompensoida kuorman epäbalanssia, kuten avoimella säädöllä. Oletusarvoisesti käyttäjän määrittämä loistehotaso on nolla, mutta halutessaan käyttäjä voi antaa säätimelle muunkin asetusarvon. Asetusarvo on kuitenkin rajoitettu siten, että sen voi asettaa suurimmillaan noin 10 %:iin SVC:n kokonaistehosta. Kovin suuria staattisia loistehoarvoja ei ole kuitenkaan järkevää tuottaa, sillä tämä syö pois SVC:n dynaamisen kompensoinnin aluetta.

Takaisinkytketyssä säädössä käytetään PCC:n mittauksia. Tällöin myös päämuuntajassa syntyvä loisteho kompensoidaan, eli sähköverkosta katsottuna liityntäpisteessä näkyvä loisteho saadaan nolnaan. Takaisinkytketyssä säädössä loistehon laskenta suoritetaan samalla tavalla kuin avoimessa säädössä, eli vaihekohtainen loisteho lasketaan vaihekäännetyillä jännite- ja virtamittauksilla. Laskennan jälkeen avoimesta säädöstä poiketen vaihekohtaiset loistehot summataan yhteen, jolloin saadaan laskettua hetkellinen PCC:ssä näkyvä kokonaisloisteho. Summauksen jälkeen kokonaisloisteho viedään integroivalle säätimelle, jolle tuodaan myös käyttäjän määrittämä asetusarvo. I-säädin pyrkii säätämään asetusarvon ja mittausarvon välisen erosuureen nolnaan ohjaamalla ulostuloaan, joka summataan joka vaihevälin avoimen säädön suskeptanssiohjeiseen yhtä suurena. [8]

I-säätimen virityksessä on otettava huomioon sen vaikutus avoimen säädön välkynnän kompensointiin. I-säädintä ei tule virittää kovin nopeaksi, sillä tällöin se voi reagoida hetkellisiin loistehon vaihteluihin ja näin haitata avoimen säädön välkynnän kompensointia. Riittävän hitaaksi viritettynä se pitää pitkäaikaisen loistehon keskiarvon nollassa eikä se vaikuta välkynnän kompensointiin. Pitkäaikainen loistehon keskiarvon laskentajakso voisi tässä tapauksessa vastata esimerkiksi sähköyhtiöiden käyttämää loistehomaksujen määrittämisen aikaikkunaa. Näin SVC:n I-säädin huolehtisi siitä, ettei loistehomaksuja pääse syntymään.

4.2.3. Tyristorien liipaisuohjeiden laskenta

Avoimen ja suljetun säädön suskeptanssilaskennan jälkeen lasketut suskeptanssit tulee muuttaa tyristoriventtiilien liipaisuohjeiksi. Suskeptansseja ei kuitenkaan viedä suoraan linearisointilohkolle, sillä laskettujen suskeptanssien summa on itse asiassa kuorman sen hetkinen suskeptanssi. Kuorman loistehon kompensoimiseksi tarvittava SVC:n suskeptanssi on kuorman suskeptanssin vastaluku. Tarvittavasta SVC:n suskeptanssista on kuitenkin vielä laskettava TCR:n suskeptanssiohje, sillä TCR:llä säädetään SVC:n suskeptanssi. TCR:n suskeptanssiohje saadaan summaamalla SVC:n ohje SVC:n suodatinparistoiden kokonaissuskeptanssiin, jolloin tulokseksi saadaan TCR:n suskeptanssiohje. Suskeptanssiohjeita laskettaessa määritellään induktiivinen suskeptanssi negatiiviseksi ja kapasitiivinen positiiviseksi. Yhtälöinä TCR:n suskeptanssiohjeen laskenta on seuraavanlainen:

$$B_{\text{SVC}} = B_{\text{F}} + B_{\text{TCR}} \quad (11)$$

$$B_{\text{TCR}} = B_{\text{SVC}} - B_{\text{F}} \quad (12)$$

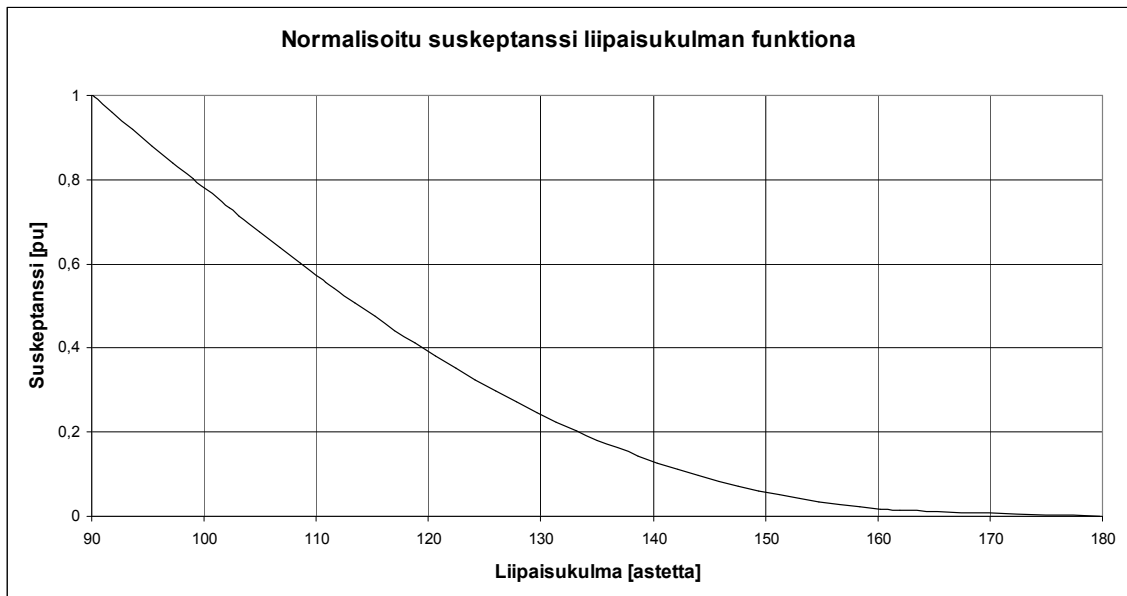
$$B_{\text{TCR}} = (-B_{\text{LOAD}}) - B_{\text{F}} \quad (13)$$

$$(-B_{\text{TCR}}) = B_{\text{LOAD}} + B_{\text{F}}. \quad (14)$$

Yhtälöissä susceptanssien alaindeksit kuvaavat SVC:n, TCR:n, kuorman ja suodatinparistojen susceptansseja. Viimeisessä yhtälössä TCR:n susceptanssi muutetaan positiiviseksi, sillä myöhemmässä laskennassa on helpompi käyttää positiivista arvoa TCR:n susceptanssiohjeelle. [8]

TCR:n susceptanssiohjeen määrittämisen jälkeen ohje viedään rajoittimelle, jolla ohje rajoitetaan järkeviin arvoihin. Käytännössä raja-arvona alarajalla on nolla ja ylärajalla TCR:n maksimiususceptanssi.

Susceptanssiohje ei sinällään käy tyristoriventtiilien liipaisuohjeeksi, vaan susceptanssiohje täytyy linearisoida ennen tyristoriventtiileille viemistä. Linearisointia varten NDC:ssä on linearisointi-lohko, jonka sisääntulo on normalisoitu susceptanssi ja ulostulo on susceptanssia vastaava TCR:n liipaisukulma. Linearisointilohkon sytytyskulman määrittäminen perustuu luvussa 2.1.1 esitettyyn yhtälöön (1). Lohko itsessään ei sisällä funktiota, vaan lukupareja, joiden mukaan oikea liipaisukulma määritetään. Lohkon lukuparitaulukko on esitetty graafisessa muodossa kuvassa 4.5, josta voidaan todeta, että susceptanssin ja liipaisukulman välinen linearisointi on tarpeellista. TCR:n normalisoitu susceptanssi on alueensa puolessa välissä, kun liipaisukulma on noin 114°. Kun liipaisukulma on 135°, eli sallitun liipaisujakson puolessa välissä, on susceptanssin arvo 20 % maksimiarvostaan.



Kuva 4.5. TCR:n normalisoitu susceptanssi tyristoriventtiilien liipaisukulman funktiona.

Kuvaa 4.5 voidaan käyttää myös tarkasteltaessa liipaisuohjeen laskennassa esiintyvien virheiden vaikutusta säädön lopputulokseen. Käyrän alkuosalla virheet vaikuttavat merkittävästi enemmän lopputulokseen kuin käyrän loppuosalla. Mikäli liipaisukulmassa on viiden asteen virhe käyrän alkupäässä, tarkoittaa se 0,1 pu:n virhettä susceptanssissa. Käyrän loppuosalla sama viiden asteen virhe liipaisukulmassa aiheuttaa susceptanssissa vain 0,01 pu:n virheen. Eli virheestä johtuva vakiosuuruinen viive liipaisussa ei aiheuta koko säätöalueella vakiona pysyvää virhettä TCR:n susceptanssissa.

5. TEOLLISUUS-SVC:N VEKTORISÄÄTÖJÄRJESTELMÄ

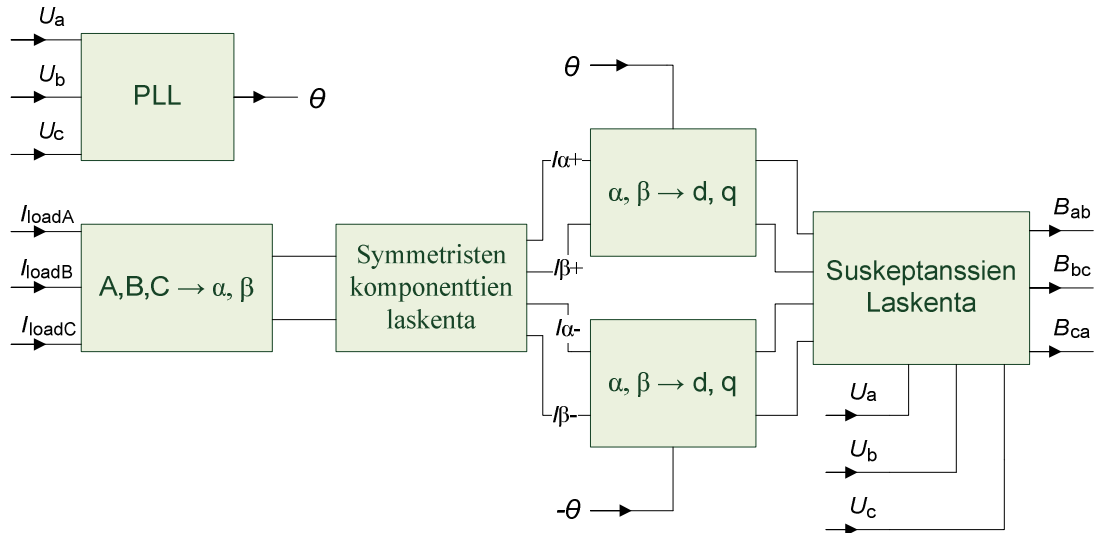
Ensimmäiset avaruusvektorilaskentaan perustuvat SVC:n säätöjärjestelmät esitettiin kirjallisuudessa jo 80-luvulla. Vektorilaskenta yleistyi SVC:ssä, kun analogisista säätöjärjestelmistä siirryttiin digitaalisiin. Nykyään SVC:ssä käytetään sekä vektorilaskentaan että perinteiseen vaihekääntöön perustuvia säätöratkaisuja. Tämän työn tavoitteena on vertailla näiden kahden säätötavan suorituskykyä.

Kirjallisuudesta löytyy erilaisia tapoja toteuttaa vektoripohjainen säätö, mutta periaatteeltaan ne kuitenkin ovat samankaltaisia. Tehtävänä on selvittää kuorman virran ja jännitteen perusteella sopivat suskeptanssiohjeet TCR:lle. Laskenta voidaan toteuttaa joko hetkellisiä tehoja [18], [19] tai virran hetkellisarvoja [7], [20] käyttäen. Molemmissa tavoissa erotellaan kuorman myötä- ja vastaverkon suuret toisistaan, ja niiden avulla lasketaan TCR:lle vaihevälikohtaiset suskeptanssiohjeet. Hetkellisiä tehosuureita käytettäessä määritetään myötä- ja vastaverkon hetkellinen pätö- ja loisteho. Virran hetkellisarvoja käytettäessä samat suuret selvitetään kuormavirrasta. Lopputulos on kuitenkin molemmilla tavoilla sama, sillä varsinainen suskeptanssien laskenta toteutetaan molemmilla menetelmillä lähes samoilla relaatioilla.

Tässä työssä suskeptanssilaskenta päätettiin toteuttaa virran hetkellisarvojen perusteella. Valintaperusteena oli laskennan selkeys. Virran hetkellisarvoihin perustuvassa laskennassa säädöstä saadaan suoraviivaisempi, kun tehosuureita ei tarvitse laskea.

5.1. Säädön rakenne

Lohkokaavio kehitellystä säätöratkaisusta on esitetty kuvassa 5.1. Laskentaan tarvitaan kuormavirrat (kuvassa I_{loadA} , I_{loadB} ja I_{loadC}) ja SVC-kiskoston jännite (kuvassa U_a , U_b ja U_c), joiden oletetaan sisältävän ainoastaan perustaajuisia komponentteja. Vaihelukitun silmukan (engl. Phase Locked Loop, PLL) avulla määritetään SVC-kiskon jännitevektorin vaihekulma. Kuormavirrat sen sijaan muutetaan ensin stationääriseen vektorikoordinaatistoon, jossa niistä erotellaan myötä- ja vastakomponentit. Tämän jälkeen erotellut komponentit muutetaan synkronisiin vektorikoordinaatistoihin: myötäkomponentti jännitteen myötäkomponenttiin sidottuun koordinaatistoon ja vastakomponentti jännitteen vastakomponenttiin sidottuun koordinaatistoon. Synkronisen koordinaatiston symmetriset komponentit muunnetaan osoitinsuureiksi jakamalla ne neliöjuuri kahdella, sillä oletuksen mukaisesti virrat sisältävät ainoastaan perustaajuisia komponentteja. Tämän jälkeen vaihevälikohtaiset suskeptanssiohjeet lasketaan osoitinlaskentaa käyttäen.



Kuva 5.1. Lohkokaavio vektorisäädön susceptanssiohjeiden laskennasta kuorman virtojen ja jännitteiden perusteella.

Synkronisiin koordinaatistoihin siirryttäessä molemmissa muunnoksissa käytetään PLL:ltä saatua myötaverkon jännitevektorin vaihekulmaa. Oletuksena on, että SVC-kiskon jännitteissä ei esiinny juurikaan vastakomponenttia, ja tästä syystä erilliselle vastaverkon jännitevektorin vaihekulman määrittävälle PLL:lle ei ole tarvetta. Niinpä siirryttäessä stationäärisestä koordinaatistosta synkroniseen vastakomponentin tapauksessa käytetään myötaverkon vaihekulmaa negatiivisena.

5.1.1. Avaruusvektorteoriaa

Avaruusvektorit tarjoavat kätevän tavan tarkastella kolmivaihejärjestelmää. Avaruusvektorteoriaa käyttämällä hetkelliset kolmivaihesuureet saadaan muutettua yhdeksi kompleksitasossa esitettäväksi vektoriksi. Muunnoksen seurauksena matemaattinen laskenta yksinkertaistuu, sillä kaikkia kolme vaihesuuretta voidaan tarkastella yhden vektorin avulla. Avaruusvektorteoria kehitettiin alun perin sähkömoottoreiden tarkasteluun, mutta nykyään sitä sovelletaan hyvin monenlaisten sähkölaitteiden tarkasteluihin, kuten taajuudenmuuttajiin ja kompensointilaitteisiin. [21], [22]

Kolmivaihesuureen avaruusvektori $\underline{x}(t)$ ajanhetkellä t määritellään vaihesuureiden $x_a(t)$, $x_b(t)$ ja $x_c(t)$ hetkellisarvojen ja yksikkövektorin $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$ avulla seuraavasti:

$$\underline{x}(t) = \frac{2}{3}(x_a(t) + \underline{a}x_b(t) + \underline{a}^2x_c(t)). \quad (15)$$

Mikäli vaihesuureissa esiintyy nollakomponenttia, tulee se laskea erikseen yhtälön (16) mukaan:

$$x_0(t) = \frac{1}{3}(x_a(t) + x_b(t) + x_c(t)). \quad (16)$$

Käyttäen edellä esitettyjä muunnoksia saadaan stationäärisessä koordinaatistossa esitetty avaruusvektori, joka voidaan edelleen esittää myös komponenttimuodossa

$\underline{x} = x_\alpha + jx_\beta$, missä x_α kuvaa reaaliakselin suuntaista komponenttia ja x_β imaginääriakselin suuntaista komponenttia. Stationäärisessä koordinaatistossa vektori $\underline{x}(t)$ pyörii vastapäivään verkon vaihesuureiden määräämällä kulmanopeudella. Tämä tarkoittaa sitä, että suureen alkuperäiset taajuuskomponentit näkyvät samalla taajuudella myös stationäärisessä vektorikoordinaatistossa. Vektorimuunnos voidaan esittää myös matriisimuunnoksena, jolloin sitä kutsutaan Clarken muunnokseksi. Muunnos on esitetty yhtälössä (17) [21]:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Vektorimuunnosta on havainnollistettu graafisesti kuvassa 5.2 (a).

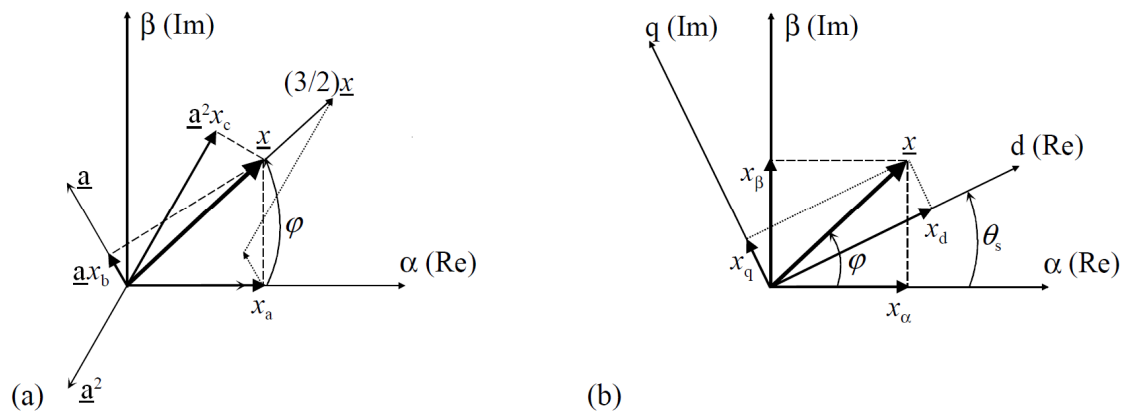
Avaruusvektori voidaan esittää myös synkronisessa koordinaatistossa, jolloin myös koordinaatistolla on määrätty kulmanopeus. Koordinaatisto voidaan sitoa esimerkiksi verkon jännitettä vastaavaan avaruusvektoriin, jolloin koordinaatiston kulmanopeutta vastaavat taajuuskomponentit näkyvät koordinaatistossa tasakomponentteina. Komponenttien vaihekulma verkon jännitteisiin nähden määrää tällöin komponenttien muodostaman vektorin suunnan koordinaatistossa.

Stationäärin koordinaatiston avaruusvektori saadaan esitettyä synkronisessa koordinaatistossa seuraavasti:

$$\underline{x}^s = |\underline{x}| e^{j(\varphi - \theta_s)} = \underline{x} e^{-j\theta_s}, \quad (18)$$

missä \underline{x}^s tarkoittaa synkronisen koordinaatiston avaruusvektoria, φ stationäärin koordinaatiston avaruusvektorin asentokulmaa ja θ_s synkronisen koordinaatiston kulmaa.

Kuvassa 5.2 (b) muunnosta on havainnollistettu graafisesti. [21]



Kuva 5.2. (a) Avaruusvektorin muodostuminen vaihesuureista stationäärisessä koordinaatistossa. (b) Avaruusvektorin muodostuminen synkronisessa koordinaatistossa. [21]

Edellä mainittu vektorimuunnos voidaan esittää myös matriisimuodossa (yhtälö (19)), jota kutsutaan myös Parkin muunnokseksi. Matriisissa x_d on synkronisen koordinaatiston reaaliakselin suuntainen komponentti ja x_q imaginääriakselin suuntainen komponentti [21].

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s & 0 \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Mikäli synkronisen koordinaatiston avaruusvektori sisältää ainoastaan perustaajuuden komponentin, niin avaruusvektorin kohtisuorat komponentit voidaan muuttaa osoittinsuureiksi seuraavasti:

$$\operatorname{Re}(\underline{X}) = \frac{x_d}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

$$\operatorname{Im}(\underline{X}) = \frac{x_q}{\sqrt{2}}, \quad (21)$$

joissa \underline{X} kuvaa avaruusvektoria $\underline{x}(t)$ vastaavaa osoitinta.

Avaruusvektoreilla voidaan laskea hetkellinen niin sanottu imaginäärinen teho, joka saadaan laskettua seuraavasti [21]:

$$q = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{\underline{u} \underline{i}^*\} = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q), \quad (22)$$

joka voidaan kirjoittaa myös hetkellisten kolmivaihesuureiden avulla:

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_a (u_b - u_c) + i_b (u_c - u_a) + i_c (u_a - u_b)]. \quad (23)$$

5.1.2. Symmetristen komponenttien laskeminen vektorikoordinaatistossa

SVC:n vektoripohjaisessa säädössä kuormavirran myötä- ja vastakomponentit tulee tuntea suskeptanssien laskemiseksi. Eräs vaihtoehto myötä- ja vastakomponenttien laskentaan olisi selvittää ne jo mitatuista vaihesuureista ja muuttaa vasta tämän jälkeen erotellut komponentit vektorisuureiksi. Toisena vaihtoehtona on selvittää symmetriset komponentit vasta vektorikoordinaatistossa. Vektorikoordinaatistossa komponenttien erottelu voidaan toteuttaa joko stationäärisessä koordinaatistossa tai synkronisessa koordinaatistossa. Stationäärisessä koordinaatistossa erottelu voidaan toteuttaa perustuen samoihin relaatioihin kuin vaihetasossa. Synkronisessa koordinaatistossa erottelu toteutetaan taajuuteen perustuen. Työn ensimmäisen vaiheen simuloinneissa vertailtiin kahta erilaista tapaa selvittää symmetriset komponentit vektoritasossa.

Stationäärisessä vektorikoordinaatistossa symmetriset komponentit voidaan erotella tavalla, jossa oletetaan perustaajuisen sinimuotoisten verkon vaihesuureiden pysyvät muuttumattomina pienen ajanjakson ajan. Lähtökohtana on kolmivaihejärjestelmä, joka esitetään symmetristen komponenttien avulla [23]:

$$\begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} = \hat{X}_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \cos(\omega t + \varphi_p - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \varphi_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + \hat{X}_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_n) \\ \cos(\omega t + \varphi_n + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \varphi_n - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + \hat{X}_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_0) \\ \cos(\omega t + \varphi_0) \\ \cos(\omega t + \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Yhtälössä \hat{X}_p tarkoittaa myötäjärjestelmän amplitudia, \hat{X}_n vastajärjestelmä amplitudia, \hat{X}_0 nollajärjestelmän amplitudia ja vaihekulma φ kuvaa kunkin järjestelmän vaihekulmaa. Kolmivaihejärjestelmästä voidaan siirtyä stationääriseen vektorikoordinaatistoon käyttämällä luvun 5.1.1 yhtälöä (15). Esittämällä lausekkeella saatu vektori myötä- ja vastakomponentin amplitudien avulla saadaan lauseke (25):

$$\underline{x}(t) = \hat{X}_p e^{j(\omega t + \varphi_p)} + \hat{X}_n e^{-j(\omega t + \varphi_n)}, \quad (25)$$

joka voidaan lausua myös myötä ja vastakomponentin vektoreilla muodossa:

$$\underline{x}(t) = \underline{x}_p(t) + \underline{x}_n(t). \quad (26)$$

Avaruusvektoreiden määritelmän mukaisesti nollakomponentin muunnos täytyy tehdä erikseen. Tässä yhteydessä muunnosta nollakomponentille ei kuitenkaan tarvitse tehdä, sillä oletuksena on, että SVC:n kompensoimassa kuormituksessa sitä ei esiinny. [23]

Vektorimuunnoksen jälkeen kirjoitetaan yhtälöpari sillä oletuksella, että sinimuotoisten vaihesuureiden amplitudit pysyvät muuttumattomana pienen ajanjakson τ . Tällöin saadaan yhtälöpari:

$$\begin{cases} \underline{x}(t) = \underline{x}_p(t) + \underline{x}_n(t) \\ \underline{x}(t - \tau) = e^{-j\omega\tau} \underline{x}_p(t) + e^{j\omega\tau} \underline{x}_n(t). \end{cases} \quad (27)$$

Ratkaisemalla yhtälöparista myötä- ja vastakomponentit saadaan:

$$\underline{x}_p(t) = \frac{-j}{2 \sin(\omega\tau)} [e^{j\omega\tau} \underline{x}(t) - \underline{x}(t - \tau)] \quad (28)$$

$$\underline{x}_n(t) = \frac{j}{2 \sin(\omega\tau)} [e^{-j\omega\tau} \underline{x}(t) - \underline{x}(t - \tau)] \quad (29)$$

Lausekkeita (28) ja (29) voidaan sieventää, jos ajanjaksoksi τ asetetaan kulmataajuuden ω määräämä jaksonajan neljännes eli $\tau = T/4$. Tällöin lausekkeen sievenevät muotoon:

$$\underline{x}_p(t) = \frac{1}{2} \left[\underline{x}(t) + j \underline{x}(t - \frac{T}{4}) \right] \quad (30)$$

$$\underline{x}_n(t) = \frac{1}{2} \left[\underline{x}(t) - j \underline{x}(t - \frac{T}{4}) \right]. \quad (31)$$

Lausekkeen perusteella ajanhetkellä t myötä- ja vastakomponentti saadaan selville stationäärisessä vektorikoordinaatistossa, mikäli reaali- ja imaginääriakselien suuntaiset komponentit tunnetaan kyseisellä hetkellä ja neljännesjaksoa aiemmin.

Synkronisessa koordinaatistossa symmetristen komponenttien erottelu perustuu taajuustasoon. Sähköverkkoon synkronoidussa koordinaatistossa myötäverkon suuret esiintyvät tasasuureina. Vastaverkon suuret sen sijaan näkyvät yliaaltojen tavoin vaihtosuureina. Synkronisen koordinaatiston taajuuden ollessa 50 Hz, vastaverkon perustajuiset suuret näkyvät koordinaatistossa 100 Hz:n ac-suureina. Samalla taajuudella esiintyy myös mahdollinen kolmas yliaalto. Synkroninen koordinaatisto voidaan myös

kiinnittää vastaverkkoon, jolloin vastaverkon suureet näkyvät koordinaatistossa tasasuu-reina. Tällöin myötäverkon suureet näkyvät koordinaatistossa 100 Hz:n taajuuskomponentteina. Varsinainen komponenttien erottelu voidaan suorittaa synkronisessa koordinaatistossa joko Fourier'n muunnoksen tai erilaisten suodattimien avulla.

Symmetristen komponenttien erottelu voidaan toteuttaa myös avaruusvektorin derivointiin perustuen, missä laskenta perustuu samaan oletukseen sinimuotoisten vaihesuurteiden amplitudien muuttumattomuudesta pienen ajanjakson ajan. Myös tässä menetelmässä symmetristen komponenttien erottelu tapahtuisi stationäärisessä koordinaatistossa. Derivaatta-algoritmia ei kuitenkaan nähty tämän työn tarpeisiin kovin hyvänä vaihtoehtona, sillä valokaariuunin tapauksessa kuormavirta sisältää melko paljon säröä, jolloin algoritmi ei välttämättä toimi parhaalla mahdollisella tavalla. Pahimmassa tapauksessa algoritmi ei toimisi ollenkaan säröisten signaalien kanssa. Tästä syystä algoritmia ei otettu mukaan simulointeihin. Derivaatta-algoritmia on esitelty lähteissä [24] ja [25].

5.1.3. Suskeptanssiohjeiden laskenta

Vektoripohjaisessa säädössä kuorman loistehon kompensointia ei lasketa kuorman loistehon vaan kuorman virtojen kautta. Perusajatuksena on laskea kuorman ottamista virroista kuorman vaihekohtaiset susceptanssit, ja tämän jälkeen tuottaa SVC:llä yhtäsuuret susceptanssit vastakkaismerkkisinä. Näin verkon näkemä susceptanssiarvo on nolla, eikä loistehoa siirry SVC:n sekä kuorman muodostaman piirin ja sähköverkon välillä.

Vektoripohjaisen laskennan ominaisuus on, että kaikkien kolmen vaiheen hetkelisarvot esitetään yhdellä vektorilla. Perinteiseen vaihekohtaiseen laskentaan verrattuna tämä ominaisuus lisää laskennan tarvetta, kun pyritään kompensoimaan kuorman epäsymmetriaa. Vaihekohtaisessa laskennassa jokaista vaihetta voidaan käsitellä itsenäisenä kompensoitavana suureena, kunhan tarvittavat tähti-kolmio-muunnokset otetaan huomioon. Kehitellyssä säätöratkaisussa susceptanssien laskenta suoritetaan kuormavirtojen symmetristen komponenttien perusteella, joiden laskenta vektorikoordinaatistossa esitettiin edellisessä alaluvussa. Vektorikoordinaatistossa esitettyjen symmetristen komponenttien reaali- ja imaginääriakselien suuntaiset komponentit muutetaan niitä vastaaviksi osoittimiksi luvun 5.1.1 yhtälöillä (20) ja (21), sillä susceptanssiohjeet lasketaan osoitinsuureilla.

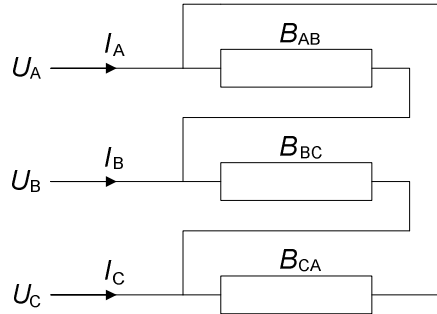
Kuvassa 5.3 on esitetty kolmioon kytketty kompensoitava piiri. Susceptanssit B_{AB} , B_{BC} ja B_{CA} ovat kolmioon kytketyn kuorman mielivaltaisia susceptansseja ja ne voivat olla kapasitiivisia tai induktiivisia. Jännitteet U_A , U_B ja U_C edustavat verkon vaihejännitteitä ja virrat I_A , I_B ja I_C kuorman vaihevirtoja. Oletetaan verkon jännitteiden olevan symmetrisiä, eli niissä ei esiinny vastakomponenttia. Merkitään jännitteen myötäkomponenttia \underline{U}_1 ja käytetään sitä referenssiosoittimeksi. Kolmiokytketylle kuormalle voidaan kirjoittaa seuraavat yhtälöt [7]:

$$\underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} \underline{B}_{AB} = j\sqrt{3}U_1 \angle 30^\circ B_{AB} \quad (32)$$

$$\underline{I}_{BC} = \underline{U}_{BC} \underline{B}_{BC} = j\sqrt{3}U_1 \angle -90^\circ B_{BC} \quad (33)$$

$$\underline{I}_{CA} = \underline{U}_{CA} \underline{B}_{CA} = j\sqrt{3}U_1 \angle 150^\circ B_{CA}, \quad (34)$$

joissa suskeptanssien etumerkit määrittävät, ovatko suskeptanssit kapasitiivisia vai induktiivisia.



Kuva 5.3. Kolmioon kytketyillä suskeptansseilla mallinnettu kompensoitava kuormitus.

Suskeptanssin \underline{B}_{AB} läpi kulkeva virta voidaan muuttaa vaihevirraksi $\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}$ ja vastaavalla tavalla saadaan lausekkeet \underline{I}_B :lle ja \underline{I}_C :lle. Muodostamalla vaihevirtojen lausekkeet yhtälöiden (32), (33) ja (34) perusteella ja kirjoittamalla lausekkeet matriisi-muodossa saadaan:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = j\sqrt{3}U_1 \begin{bmatrix} 1\angle 30^\circ & 0 & 1\angle -30^\circ \\ 1\angle -150^\circ & 1\angle -90^\circ & 0 \\ 0 & 1\angle 90^\circ & 1\angle 150^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Symmetristen komponenttien ja vaihevirtojen välillä vallitsee jo aikaisemminkin mainittu yhteys:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}, \quad (36)$$

jossa \underline{I}_1 on virran myötäkomponentti, \underline{I}_2 virran vastakomponentti, \underline{I}_0 virran nollakomponentti ja \underline{a} on vaiheenkäntöoperaattori, eli $\underline{a} = 1\angle 120^\circ$. Kun matriisi (35) sijoitetaan matriisiin (36) saadaan:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = U_1 \begin{bmatrix} 1\angle 90^\circ & 1\angle 90^\circ & 1\angle 90^\circ \\ 1\angle 150^\circ & 1\angle -90^\circ & 1\angle 30^\circ \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Oletuksena oli, että kuorma on kytketty kolmioon ja tämän vuoksi matriisiin (37) mukaan nollakomponenttia ei esiinny. Yhtälöstä nähdään myös, että virran myötäkomponentti on puhtaasti imaginääristä, toisin sanoen kuormassa ei esiinny resistanssia. Erottelemalla myös virran vastakomponentin reaali- ja imaginääriosat saadaan:

$$\begin{bmatrix} \text{Im}(\underline{I}_1) \\ \text{Re}(\underline{I}_2) \\ \text{Im}(\underline{I}_2) \end{bmatrix} = U_1 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\sqrt{3}/2 & 0 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Suskeptanssiarvot saadaan ratkaistua kääntämällä kerroinmatriisi:

$$\begin{bmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{3} & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & \sqrt{3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Im}(\underline{I}_1)/U_1 \\ \text{Re}(\underline{I}_2)/U_1 \\ \text{Im}(\underline{I}_2)/U_1 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Yhtälön (39) susceptanssit kuvaavat kuorman susceptansseja kolmioon kytkettyinä. Susceptanssit saavat positiivisia arvoja, kun kuorma on kapasitiivinen ja negatiivisia, kun kuorma on induktiivinen. Tuottamalla SVC:llä kunkin susceptanssin vastaluku, saadaan kuorma balansoitua. [7], [20]

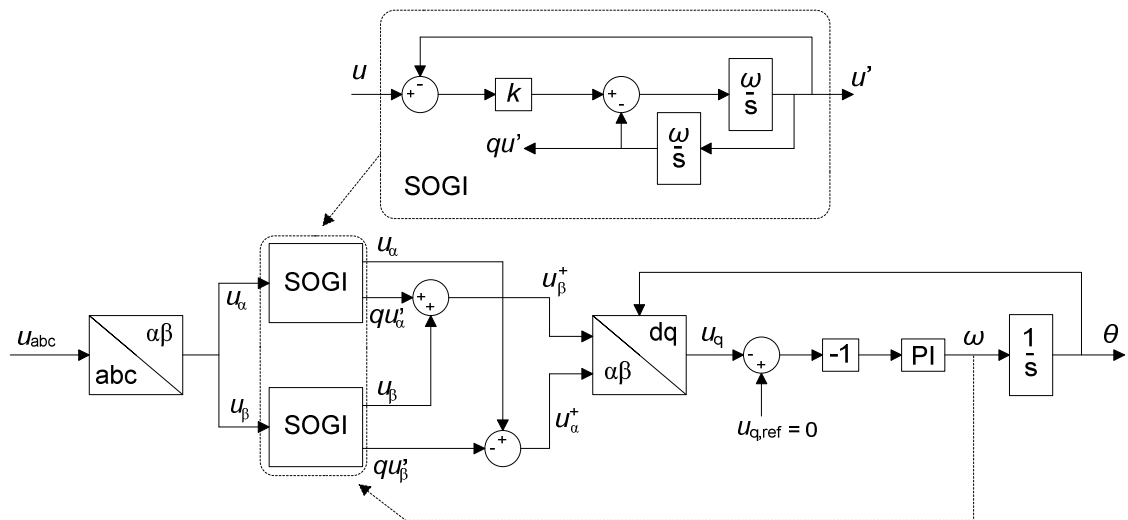
5.1.4. Vaihelukittu silmukka

Vaihelukittua silmukkaa tarvitaan säätöjärjestelmässä verkon jännitevektorin vaihekulman määrittämiseen. PLL seuraa verkon jännitteen myötäkomponenttia ja tuottaa sen vaihekulman mukaista jaksollista ramppisignaalia. Rampin nousunopeus on myötäkomponentin kulmataajuuden mukainen ja jaksonaika vastaa myötäkomponentin jaksonaikaa. Käytännössä ramppi kasvaa, kunnes se saavuttaa arvon 2π radiaania, jolloin se nolataan ja jakso alkaa alusta.

PLL:n toteutustapoja löytyy kirjallisuudesta useita. Yhtenä aikaisimpana menetelmänä on käytetty jännitteen nollakohdan havaitsemiseen perustuva tapaa. Tässä menetelmässä taajuus saadaan selville nollakohtien leikkauksien välisestä ajasta ja vaihekulma integroimalla laskettua taajuutta. Menetelmän heikkoutena on vasteaika, sillä verkon taajuuden muuttuminen havaitaan aikaisintaan puolijakson mittaisella viiveellä. Toinen soveltuva menetelmä jännitevektorin kulman määrittämiseen perustuu avaruusvektoreihin. Siinä synkronisen koordinaatiston jännitevektorin d- (dPLL) tai q-komponentti (qPLL) pyritään pitämään vakiona PI-säätimellä. Säätimen ulostuloa integroimalla saadaan vaihekulma, jota käytetään myös takaisinkytkentäsignaalina PLL:n vektorimuunnokseen. Näin PLL seuraa jännitevektorin vaihekulmaa. Menetelmä toimii hyvin silloin, kun PLL:n sisääntuloina ovat puhtaat ja symmetriset vaihejännitteet. Sisääntulojen ollessa säröytyneitä tai epäsymmetrisiä menetelmä ei pysty seuraamaan tarkasti verkon jännitteiden vaihekulmaa. [26]

Edellä mainittujen PLL-tekniikoiden lisäksi on olemassa myös kehittyneempiä PLL-toteutuksia. Paranneltujen PLL-tekniikoiden tavoitteena on parantaa häiriökestoisuutta ilman, että PLL:n vasteaika tai tarkkuus huonontuisi. Käytännössä häiriökestoisuuden lisääminen vaatii sisääntulojen suodattamisen, joka tällöin johtaa vasteaikojen kasvuun. Hyvän PLL:n pitää myös kyetä erottelamaan jännitteen myötäkomponentti tarkasti ja nopeasti, mikäli jännitteissä ilmenee epäsymmetriaa. Erilaisia tapoja vastata näihin vaatimuksiin on esitelty ja vertailtu lähteissä [26], [27].

Tässä työssä PLL:n valintaan vaikuttivat PLL:n vasteaika, rakenteen yksinkertaisuus sekä tarkkuus, kun sisääntulojännitteet ovat epäsymmetrisiä ja sisältävät harmonisia yliaaltoja. Lähteiden [26] ja [27] pohjalta tarkempaan tutkintaan valittiin Dual Second Order Generalized Integrator -PLL (DSOGI-PLL), jonka lohkokkaavio on esitetty kuvassa 5.4. Lähteissä oli vertailtu eri PLL-toteutusten ominaisuuksia ja tuloksien perusteella DSOGI-PLL vastasi hyvin annettuihin vaatimuksiin. DSOGI-PLL on synkroniseen koordinaatistoon perustuva PLL (engl. Synchronous Reference Frame PLL, SRF-PLL), jossa PLL:n vaihekulma sidotaan PI-säätäjällä verkon vaihekulmaan pitämällä q-komponentti arvossa nolla. SRF-PLL:n lisäksi DSOGI-PLL sisältää verkon jännitteiden myötäkomponentin laskennan, jolloin SRF-PLL lukitsee vaihekulman nimenomaan myötäkomponentin vaihekulmaan. [26], [27]



Kuva 5.4. DSOGI-PLL:n lohkokkaavio. [27]

Lähteissä [27] ja [28] DSOGI-PLL:n sisäinen myötäkomponentin laskenta on toteutettu stationäärisessä koordinaatistossa 90° vaiheenjättöön perustuvalla menetelmällä. Käytetyn menetelmän johtamistapa on lähteissä kyseenalainen, mutta menetelmällä saatava lauseke myötäkomponentille vastaa luvussa 5.1.2 esitettyä yhtälöä (30) ja tästä syystä lausekkeen lopputulosta käytetään PLL:ssä myötäkomponentin selvittämiseen.

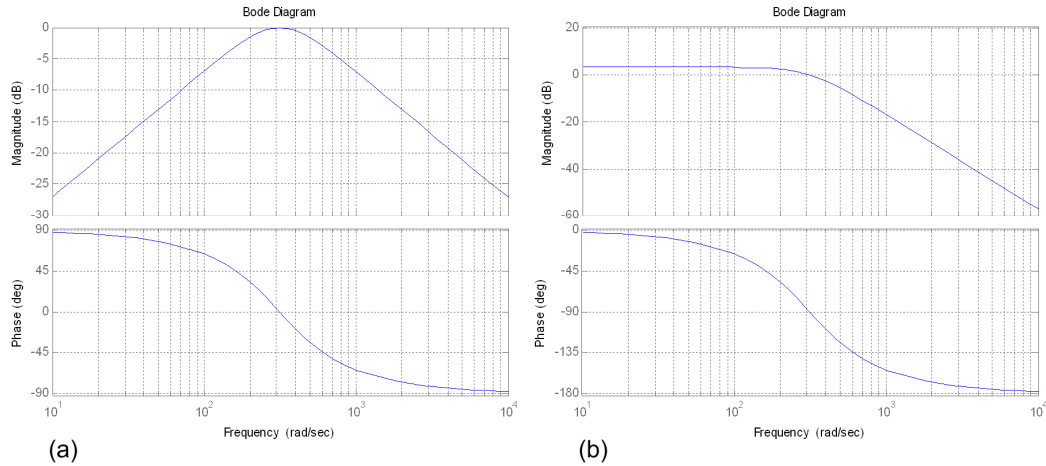
Laskentaan tarvittava neljännesjakson vaihe siirto saadaan aikaan kahdella toisen asteen integrointipiirillä (engl. Second Order Generalized Integrator, SOGI), jotka toimivat signaaleille myös ali- ja kaistanpäästösuodattimina. Kaistanpäästösuodatin toimii ainoastaan häiriösuodattimena, mutta alipäästösuodatin toimii myös vaiheensiirto-operaattorina. Suodattimien rajataajuudet liikkuvat havaitun verkon taajuuden mukana, sillä suodattimien yhtenä parametrina on SRF-PLL:n takaisinkytketty kulmataajuus. Näin PLL:stä saadaan myös taajuusadaptiivinen. [27], [28]

SOGI:en kaistanpäästö- ja alipäästösuodattimien siirtofunktiot ($D(s)$ ja $Q(s)$) esitettyinä kuvan 5.4 merkinnöillä ovat Laplace-tasossa seuraavat [28]:

$$D(s) = \frac{u'}{u}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (40)$$

$$Q(s) = \frac{qu'}{u}(s) = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (41)$$

Siirtofunktioiden Bode-diagrammit on esitetty kuvassa 5.5, kun $\omega = 2\pi \cdot 50$ rad/s ja $k = 1,41$.



Kuva 5.5. Siirtofunktioiden Bode-diagrammit, kun $\omega = 100\pi$ rad/s ja $k = 1,41$. (a) $D(s)$ ja (b) $Q(s)$.

DSOGI-PLL:n malli rakennettiin Matlabin Simulink –ohjelmaan, jossa sen toiminnallisuutta testattiin ja verrattiin aikaisemmin SVC:ssä käytettyyn Atan2-PLL:ään. Atan2-PLL perustuu niin ikään synkroniseen vektorikoordinaatistoon, mutta siinä PI-säätimelle viedään jännitevektorin kulman erosuure q-komponentin erosuureen sijaan. Kulma lasketaan d- ja q-komponenteista arkustangentilla. Muutoin varsinainen vaihekulman tuottaminen toimii samalla tavalla kuin DSOGI-PLL:ssäkin. Suodattimena Atan2-PLL:ssä sen sijaan on vain yksinkertainen alipäästösuodin, jolla pyritään suodattamaan jännitesignaaleista pois sekä vastakomponentti että yliaallot.

Simuloinneissa testiympäristö sisälsi sekä puhtaita siniaaltolähteitä sekä häiriölähteitä. Häiriölähteinä käytettiin jännitteen vastakomponenttia, yliaaltoja ja mittauskohinaa. Häiriösignaalien suuruudet valittiin erään todellisen valokaariuunin syöttöjännitteen mittauksen pohjalta, jotta tulos vastaisi paremmin todellisuutta. Molemmat PLL:ät viritettiin siten, että häiriöiden vaikutus PLL:ien mittaamiin taajuuksiin on $\pm 0,1$ %. Simulointien perusteella edellä mainittu heilunta taajuudessa ei vaikuta juurikaan PLL:ien tuottamiin vaihekulmiin. Häiriöiden täydellinen eliminointi määritetyistä taajuuksista ei ole järkevää, sillä tällöin PLL:ien vasteajat kasvavat huomasti kasvaneiden suodattimien aikavakioiden seurauksena. PLL:issä käytetyt viritysparametrit on esitetty taulukoissa 5.1 ja 5.2.

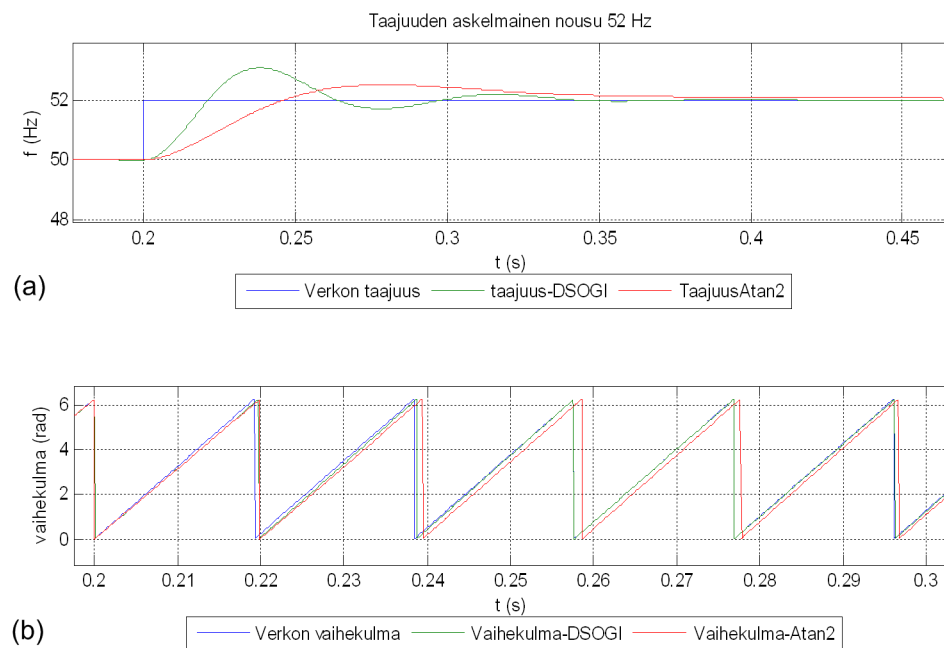
Taulukko 5.1. *Atan2-PLL:n viritysparametrit.*

Alipäästösuodattimen aikavakio, T	$15 \cdot 10^{-3} \text{ s}$
PI-säätimen yhteismuotoinen vahvistus, K	10
P-säätimen vahvistus, K_p	4,5
Integrointiaika, T_i	0,03 s

Taulukko 5.2. *DSOGI-PLL:n viritysparametrit.*

QSG:n vahvistus, k	0,18
P-säätimen vahvistus, K_p	1,11
Integrointiaika, T_i	0,056 s

Ensimmäisessä testissä PLL:ille vietiin sisään puhtaat sinimuotoiset jännitesignaalit, joissa tapahtuu taajuuden muutos 50 Hz:stä 52 Hz:iin. Tilannetta vastaava kuvaaja on esitetty kuvassa 5.6. Kuvaajasta huomataan, että DSOGI-PLL reagoi taajuuden muutokseen nopeammin, jolloin sen asettumisaika myös on lyhyempi kuin Atan2-PLL:n. Vaihekulman määrittämisen osalta DSOGI-PLL on selvästi nopeampi kuin Atan2-PLL. Atan2-PLL ei ole saavuttanut verkon vaihekulmaa vielä 100 millisekunnissaakaan. Taajuuden ja vaihekulman kuvaajia tarkastellessa on huomattava, että niissä on selkeyden vuoksi käytetty eri aikaskaalaa.



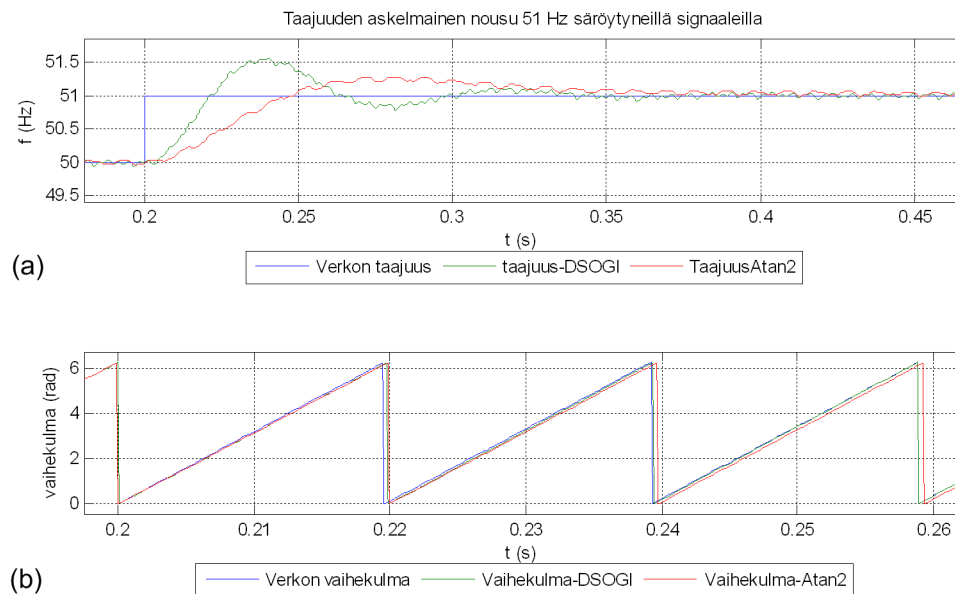
Kuva 5.6. Verkon jännitteissä tapahtuva askelmainen 2 Hz:n taajuuden nousu. (a) Verkon ja PLL:ien taajuudet, (b) verkon ja PLL:ien vaihekulmat.

Seuraavassa testissä verkon jännitteisiin lisättiin erilaisia häiriöitä. Jännitteeseen lisättyjen häiriösignaalien arvot ovat esitetty taulukossa 5.3. Signaalit valittiin valokaa-riuunin sulatuksen aikaisista jännitteistä käyttämällä laskennassa hyvin lyhyttä keskiarvostusta. Näin mittausaineistosta saatiin paremmin mukaan myös lyhytkestoiset erittäin säröytyneet kohdat. Mittauskohinaa ei luonnollisesti mittausaineistosta saatu, vaan se arvioitiin todellista tapausta vastaavaksi.

Taulukko 5.3. Simuloinnissa käytettyjen särösignaalien suuruudet perusaaltoon suhteutettuina.

vastakomp.	2. yliaalto	3. yliaalto	5. yliaalto	7. yliaalto	kohina
5 %	1,2 %	1,35 %	3,42 %	1,66 %	0,1 %

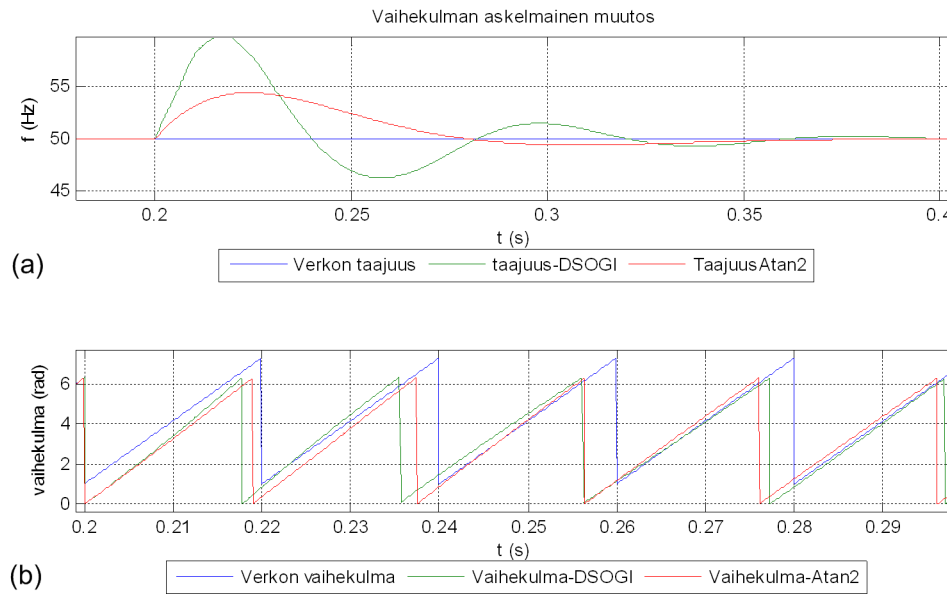
Simuloinnin tulokset on esitetty kuvassa 5.7. Myös tässä simuloinnissa taajuuteen tehtiin askelmainen muutos, jotta saatiin selville, onko säröytyneellä signaalilla vaikutusta asettumisaikaan. Asettumisaikojen osalta tulokset ovat samankaltaisia kuin edellisessä simuloinnissa. DSOGI-PLL:n asettumisaika on Atan2-PLL:ää nopeampaa sekä taajuuden että vaihekulman määrittämisessä. Särön vaikutus taajuuden ja vaihekulman tarkkuuteen on molemmilla PLL:illä yhtenevä, sillä PLL:ät viritettiin tällä perusteella. Vaihekulman tarkastelussa käytetty verkon vaihekulma edustaa säröytymättömän verkon jännitteen myötäkomponentin vaihekulmaa.



Kuva 5.7. Säröytyneissä verkon jännitteissä tapahtuva askelmainen 1 Hz:n taajuuden nousu. (a) Verkon ja PLL:ien taajuudet, (b) verkon ja PLL:ien vaihekulmat.

Kolmannessa testissä verkon jännitevektorin vaihekulmaan tehtiin askelmainen yhden radiaanin muutos. Verkon jännitteet olivat tässä tapauksessa säröytymättömiä. Si-

muloinnin tulokset ovat esitetty kuvassa 5.8, josta nähdään, että vaihekulman askelmaisessa muutoksessa DSOGI-PLL:n määrittämä taajuus heilahtelee rajusti. Atan2-PLL:n mittaama taajuus heilahtaa myös, mutta ei niin voimakkaasti. Taajuuden mittauksen asettumisaika on DSOGI-PLL:n tapauksessa hieman pidempi, mutta oikean vaihekulman DSOGI-PLL sen sijaan löytää Atan2-PLL:ää nopeammin.



Kuva 5.8. Verkon jännitteen vaihekulmassa tapahtuva askelmainen yhden radiaanin muutos. (a) Verkon ja PLL:ien taajuudet, (b) verkon ja PLL:ien vaihekulmat.

Edellä mainittujen simulointien lisäksi PLL:iä simuloitiin siten, että verkon jännitteen perusaaltoon lisättiin yksitellen vastakomponenttia, harmonisia yliaaltoja tai kohinaa. Näissä testeissä merkittävimpänä PLL:ien välisenä erona oli se, että DSOGI-PLL:n toiminta ei häiriintynyt jännitteisiin lisätystä vastakomponentista, mutta Atan2-PLL sen sijaan häiriintyi. Tulos oli odotettavissa, sillä DSOGI-PLL sisältää rakenteellisesti vastakomponentin erottelun. Harmonisten yliaaltojen tapauksessa tulokset olivat molemmilla samankaltaisia, eikä mittauskohinan lisääminenkaan aiheuttanut ongelmia. Näiden simulointien perusteella DSOGI-PLL:llä saavutetaan parempi suorituskyky niissä olosuhteissa, joissa SVC:tä käytetään. DSOGI-PLL:n etuina ovat nopeampi vasteaika ja jännitteen vastakomponentin sietokyky.

5.2. Vektorisäädön RSCAD-simuloinnit

Vektorisäädön laskenta-algoritmin kehittämisen jälkeen säätömalli rakennettiin RSCAD-simulointiohjelmistoon. RSCAD-simulointien tarkoituksena oli todentaa säätöalgoritmin toimivuus staattisessa tilanteessa ja vertailla vaihtoehtoisia tapoja suorittaa symmetristen komponenttien erottelu. Säätömallin toimivuutta todennettiin erilaisilla

kuormilla ja niiden askelmaisilla muutoksilla. Huomio simuloinneissa keskitettiin kuorman epäsymmetrian balansointiin ja kuormituksessa tapahtuvan askelmaisen muutoksen reagointinopeuteen.

RSCAD on Manitoba HVDC Research Centre:n kehittämä simulointiohjelmisto, joka on tarkoitettu sähköverkon simulointeihin. RSCAD toimii RTDS-ympäristössä (engl. Real Time Digital Simulator), jossa simulointeja varten on erillinen prosessorikortteja sisältävä räkki. RSCAD-ohjelmistoa käytetään normaalilla PC-koneella ja se toimii käyttöliittymänä RTDS-räkkiin. RTDS-räkkiin käyttäjä voi asettaa haluamansa määrän RISC- (engl. Reduced Instruction Set Computing) ja SHARC-prosessorikortteja (engl. Super Harvard Architecture Single-Step Computer), joilla laskenta tapahtuu. Prosessorikorttien määrä vaikuttaa suoraan simuloinnin pienimpään mahdolliseen aika-askeleeseen, sillä RTDS:ssa simulointi tapahtuu reaaliajassa. Tämä tarkoittaa, että kaikki simuloinnin vaatima laskenta suoritetaan valitun aika-askeleen sisällä. Mikäli laskenta-aika on pidempi kuin valittu aika-askel, simulointia ei voida käynnistää. Reaaliaikaisen simuloinnin etuna tavalliseen transienttilaskentaohjelmistoon onkin se, että reaaliaikaisella simuloinnilla voidaan simuloida laajoja sähköverkon simulointeja nopeasti, mikäli järjestelmässä on vain riittävästi prosessorikortteja. Toisaalta transienttilaskentaohjelmiston etuna on se, että se toimii tavallisella PC-koneella eikä vaadi toimiakseen erillisiä prosessorikortteja. Ilman simulaattoriin liitettyjä todellisia laitteita reaaliaikainen simulointi ei kuitenkaan tarjoa nopeuden lisäksi muita etuja transienttilaskentaohjelmistoon verrattuna. Reaaliaikaisuuden hyödyntäminen onnistuu vasta, kun simulaattoriin on kytketty esimerkiksi rele tai kompensattorin ohjausjärjestelmä. Tällaisista reaaliaikasimuloinneista kerrotaan lisää seuraavassa luvussa.

RSCAD:in toimilohkokirjastoissa on kattava kokoelma sähköverkon laitteita mallintavia toimilohkoja, kuten siirtojohtoja, katkaisijoita ja erilaisia kuormia. Kirjastoista löytyy myös valmiita malleja monimutkaisillekin komponenteille, kuten loistehon kompensattoreille ja HVDC-linkeille (engl. High Voltage Direct Current). Näille komponenteille on mahdollista rakentaa oma ohjauslogiikka käyttäen matemaattisia operaattoreita ja signaalin käsittelyyn tarkoitettuja toimilohkoja. Valmiiden toimilohkojen lisäksi RSCAD:ssä on mahdollisuus rakentaa omia toimilohkoja, jotka kirjoitetaan C-kielellä ja joiden ikonien piirtoon löytyy oma ohjelmansa. Tämän työn puitteissa RSCAD:iin luotiin DSOGI-PLL-toimilohko aikaisemmin esitetyn teorian mukaisesti.

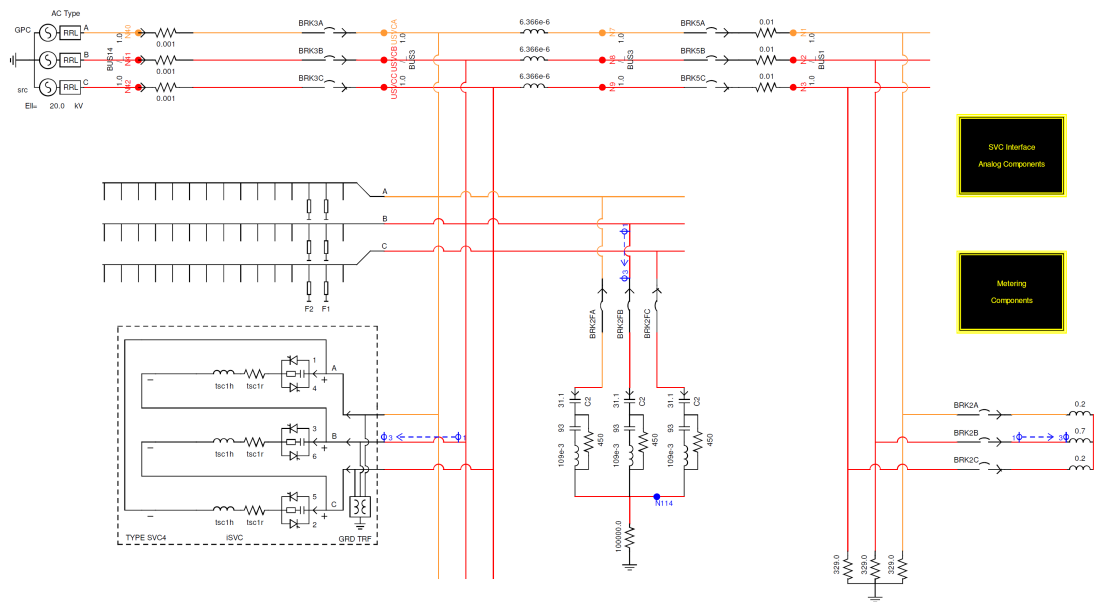
Mallin rakentamisen osalta RSCAD on helppokäyttöinen simulointiohjelmisto. Simulointimalli piirretään valitsemalla sopivat toimilohkot kirjastosta ja yhdistämällä ne johdoilla. Toimilohkoissa on kattavasti parametreja, jolloin niitä saa muokattua hyvin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Piirtämisen jälkeen simulointimalli käännetään prosessorikorttien ymmärrettäviksi käskyiksi ja kääntämisen myötä malli siirtyy myös prosessorikorteille.

Varsinaista simulointiajaoa varten RSCAD:issä on oma toimintonsa, jossa käyttäjä voi valinta mitä tietoa simuloinnista haluaa tarkastella. Käyttäjä voi luoda kuvaajat kaikista muuttujista, joita on simulointimallissaan käyttänyt. Myös kaikki ohjaukset, esi-

merkiksi katkaisijoiden ohjaukset tai jännitelähteen jännitteen säätö onnistuu reaaliaikaisena. Tällöin on helppo tarkastella niiden vaikutuksia sähköverkkoon.

5.2.1. Vektorisäädön RSCAD-simulointimalli

Vektorisäädön RSCAD-simulointimalli on esitetty kuvassa 5.9. Simulointimallia syötetään 20 kV:n jännitelähteellä, jonka oikosulkuteho on 400 MVA. Jännitelähteestä seuraavana on SVC, jossa on eriteltyinä yliaaltosuodatinpankki, TCR sekä toisen yliaallon laajakaistasuodatin. Toisen yliaallon laajakaistasuodattimelle ei löytynyt RSCAD:in toimilohkokirjastoista valmista toimilohkoa, joten se koottiin itse passiivisia komponentteja käyttäen. Yliaaltosuodatinpankista valittiin näihin simulointeihin käytettäväksi kolmannen ja neljännen yliaallon suodattimet.



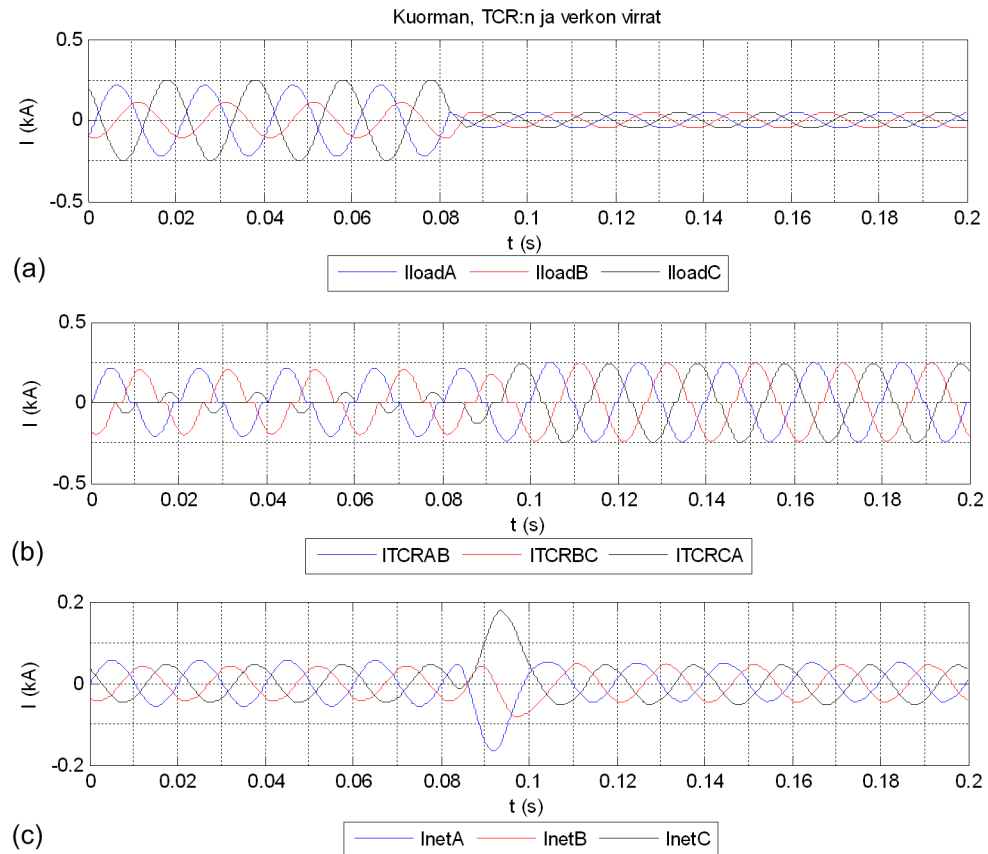
Kuva 5.9. RSCAD-simulointien verkkomalli.

5.2.2. Simulointien tulokset ja johtopäätökset

Simuloinneissa simuloitiin kahta erilaista tapaa erotella symmetriset komponentit vektorikoordinaatistossa, joista toista simuloitiin myös eri parametreilla. Komponenttien erottelumenetelmät rakennettiin käyttämällä RSCAD:in toimilohkoja aikaisemmin esitettyjen algoritmien mukaisesti. Simulointeihin käytettiin epäsymmetristä induktiivista kuormaa, joka kytkettiin katkaisijalla irti verkosta askelmaisen muutoksen aikaansaamiseksi. Ennen kuorman irtikytkentää tarkasteltiin, kuinka hyvin kuorman virrat saadaan balansoitua eri menetelmillä. Kuorman irtikytkemisen jälkeen tarkasteltiin, kuinka kauan aikaa kuluu uuden toimintapisteen löytymiseen. Kuormana olivat tähtikytketyt kelat, joiden induktanssit olivat A- ja C-vaiheissa 0,2 H ja B-vaiheessa 0,7 H.

Ensimmäisenä symmetriset komponentit eroteltiin käyttäen luvussa 5.1.2 esiteltyjä yhtälöitä (30) ja (31), joissa komponenttien erottelu perustuu neljännesjakson vaihe-
kääntöön stationäärisessä koordinaatistossa. Kuvassa 5.10 on esitetty kuvaajat kuorman

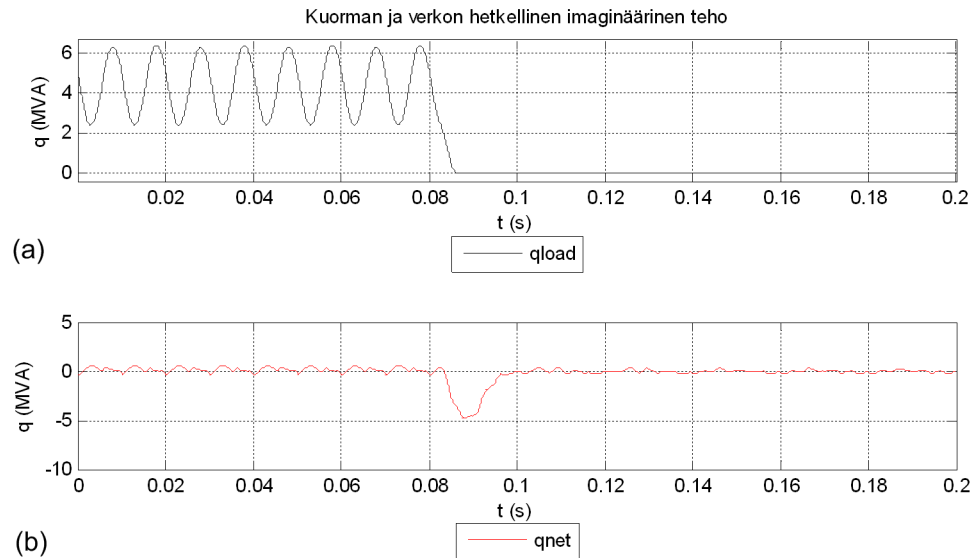
(I_{loadA} , I_{loadB} ja I_{loadC}) ja verkon (I_{netA} , I_{netB} ja I_{netC}) vaihevirroista, sekä TCR:n vaihevälivirroista (I_{TCRAB} , I_{TCRBC} ja I_{TCRCA}). Kuorma kytketään irti verkosta hetkellä 0,08 s. Kuten kuorman vaihevirtojen kuvaajasta voidaan havaita, ovat kuorman vaihevirrat selvästi epäsymmetriset. Verkon vaihevirroissa epäsymmetria ei ole niin huomattavaa, joten SVC onnistuu balansoimaan verkon vaihevirtoja. Irtikytkentähetkellä verkon vaihevirroissa esiintyy melko voimakkaat transientit SVC:n vasteajasta johtuen. TCR:n virtojen perusteella SVC:llä kuluu aikaa noin 15 ms uuden toimintapisteen löytämiseen.



Kuva 5.10. Kuvaajat epäsymmetrisen kuorman irtikytkentätilanteesta, kun symmetristen komponenttien erottelu on toteutettu stationäärisessä vektorikoordinaatistossa neljännesjakson vaihekäännöllä. (a) Kuorman vaihevirrat, (b) TCR:n vaihevälikohtaiset virrat ja (c) verkon vaihevirrat.

Kuvassa 5.11 on esitetty samasta simuloinnista kuorman ja verkon hetkellisen imaginäärisen tehon kuvaajat, joiden laskentaan on käytetty luvussa 5.1.1 esitettyä lauseketta (23). Etumerkiltään positiivinen imaginäärinen teho kuvaa induktiivisen kuorman ottamaa tehoa.

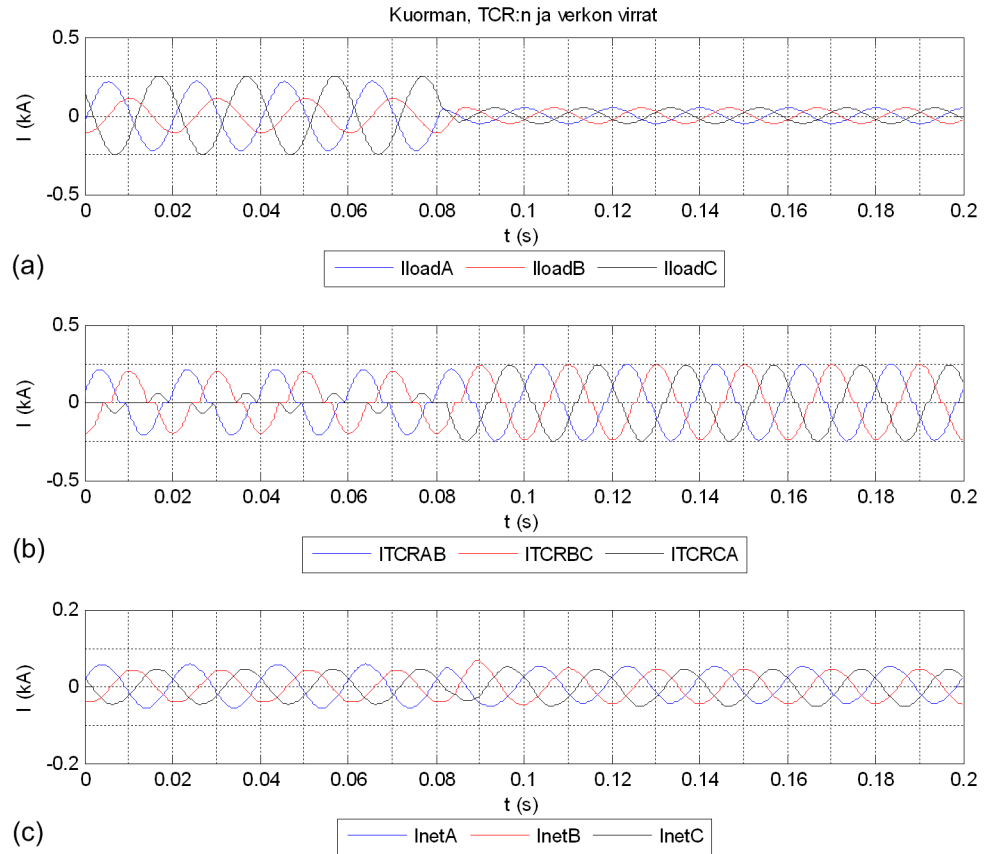
Kuvaajista voidaan todeta vasteajaksi sama noin 15 ms, kuin TCR:n vaihevirroista. Verkon imaginäärinen teho on kuorman irtikytkentähetken jälkeen kapasitiivista, sillä TCR:n imaginäärinen teho on suodatinparistojen imaginääristä tehoa pienempi. Säätojärjestelmän reagoidessa muutokseen TCR:n kuluttama imaginäärinen teho kasvaa, jolloin verkon imaginäärinen teho palautuu alkuperäiseen arvoon.



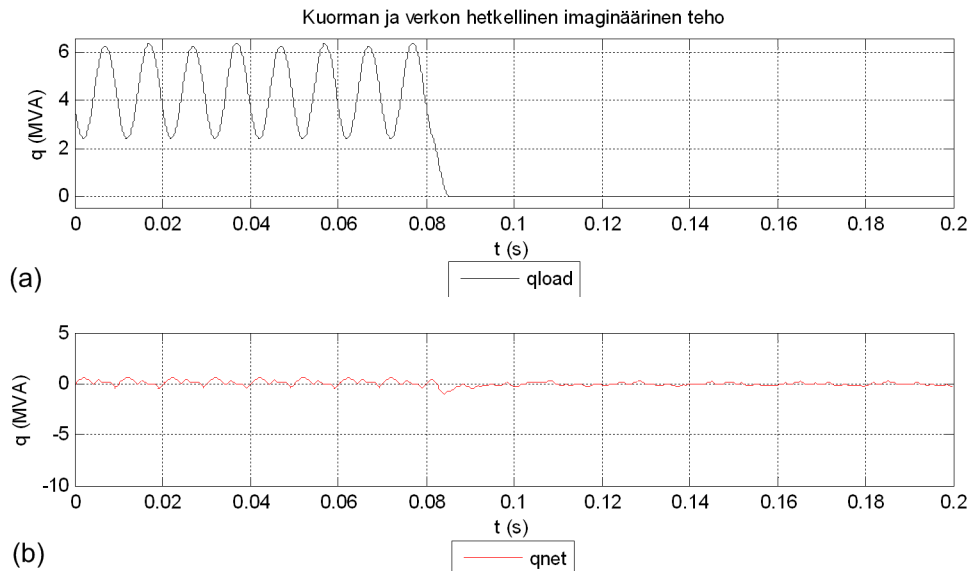
Kuva 5.11. Kuvaajat epäsymmetrisen kuorman irtikytentätilanteesta, kun symmetristen komponenttien erottelu on toteutettu stationäärisessä vektorikoordinaatistossa neljännesjakson vaihekäännöllä. (a) Kuorman hetkellinen imaginäärinen teho ja (b) verkon hetkellinen imaginäärinen teho.

Kuvassa 5.12 on esitetty vastaava tilanne, kun symmetristen komponenttien erottelu toteutetaan stationäärisessä koordinaatistossa luvun 5.1.2 yhtälöillä (28) ja (29) siten, että ajanjakso τ saa arvon $100 \mu\text{s}$. Verkon vaihevirroista nähdään, että kuorman irtikytentähetkellä virroissa näkyy vain hyvin pieni transientti. Tämä tarkoittaa, että säätöjärjestelmä pystyy reagoimaan kuorman irtikytkemiseen riittävän nopeasti. Myös TCR:n vaihevälivirroista voidaan todeta vasteajan olevan huomattavasti pienempi kuin edellisissä simuloinneissa. Kuormavirtojen balansoinnissa ei lausekkeiden välillä ole havaittavissa merkittävää eroa.

Kuvassa 5.13 on esitetty kuorman ja verkon imaginäärinen teho samasta tilanteesta. Nyt verkon imaginäärisessä tehossa näkyy vain hyvin pieni notkahdus kuorman irtikytentä jälkeä ja verkon imaginäärinen teho on palautunut irtikytentää edeltävälle tasolle noin 5 ms kuluttua irtikytentästä.



Kuva 5.12. Epäsymmetrisen kuorman irtikytkentä, kun symmetristen komponenttien erottelu on toteutettu stationäärisessä vektorikoordinaatistossa luvun 5.1.2 yhtälöillä (28) ja (29), joissa ajanjakso τ saa arvon $100 \mu s$. (a) Kuorman vaihevirrat, (b) TCR:n vaihevälikohtaiset virrat ja (c) verkon vaihevirrat.

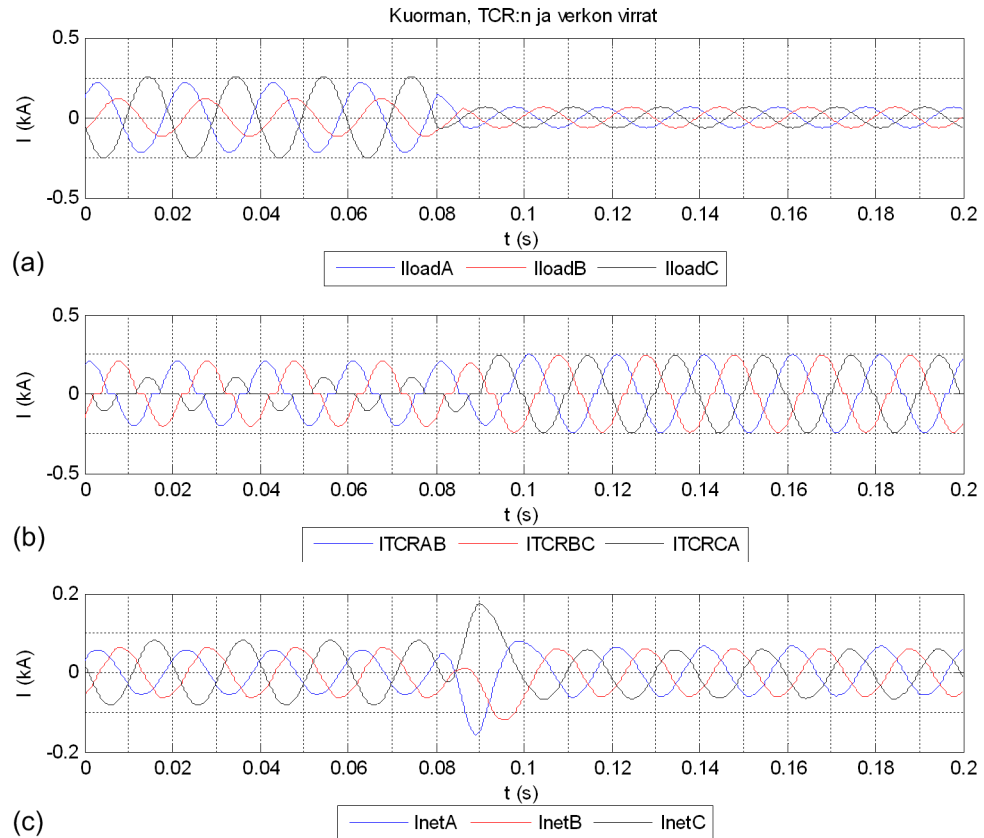


Kuva 5.13. Epäsymmetrisen kuorman irtikytkentä, kun symmetristen komponenttien erottelu on toteutettu stationäärisessä koordinaatistossa luvun 5.1.2 yhtälöillä (28) ja (29), joissa ajanjakso τ saa arvon $100 \mu s$. (a) Kuorman hetkellinen imaginäärinen teho ja (b) verkon hetkellinen imaginäärinen teho.

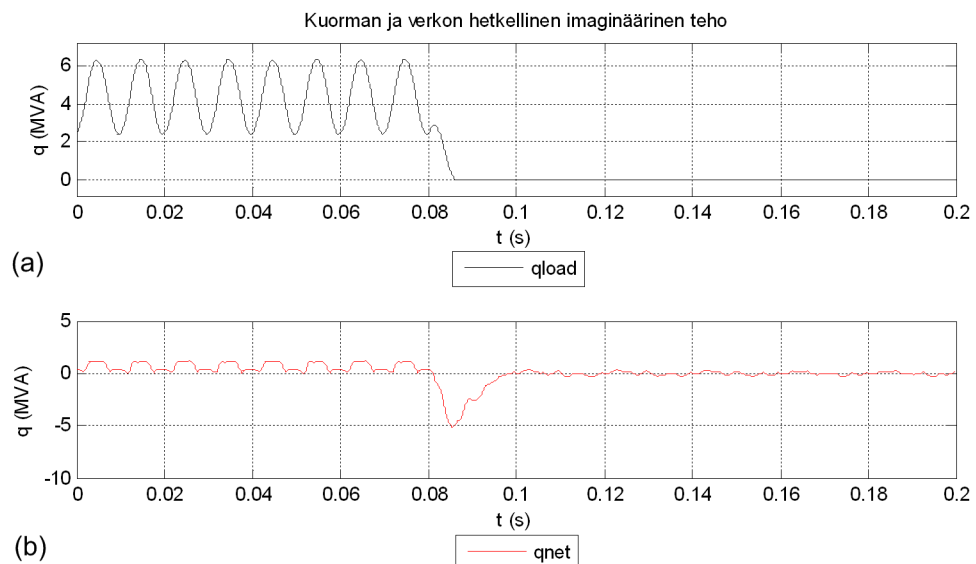
Kuvassa 5.14 ja 5.15 on esitetty samat kuvaajat, kun komponentit erotellaan synkronisessa koordinaatistossa alipäästösuodatuksella. Alipäästösuodattimina simuloinneissa on käytetty Butterworth-suodattimia 50 Hz:n rajataajuudella. Suodattimien rajataajuus valittiin kompromissina vasteajan ja kuormituksen balansoinnin onnistumisen välillä. Rajataajuuden tuli olla riittävän matala, jotta suodatus vaimentaisi suureiden ac-komponentit tehokkaasti pois signaalista. Toisaalta matala rajataajuus nosti suodatuksesta aiheutuvaa viivettä, jolloin säätöjärjestelmän vasteaika kasvoi. Näissä simuloinneissa suodattimen rajataajuutta nostettiin, kunnes ac-komponentit alkoivat näkyä epätarkkuutena kuorman epäsymmetrian balansoinnissa.

Verkon vaihevirtojen kuvaajasta voidaan nähdä, että valitulla suodatuksella SVC ei onnistu balansoimaan epäsymmetrisen kuorman vaihevirtoja niin tehokkaasti, kuin aiemmissa simuloinneissa. Tämän lisäksi myös vasteaika on nyt pidempi. Kuvan 5.15 verkon imaginäärisen tehon kuvaajasta vasteajaksi saadaan noin 20 ms. Toisaalta menetelmässä vaadittavalla alipäästösuodatuksella saadaan vaimennettua myös signaaleissa mahdollisesti esiintyviä yliaaltoja, jolloin niiden suodattamiseen ei säätöjärjestelmässä välttämättä tarvita erillistä suodatusta. Stationäärisessä koordinaatistossa suoritettavissa komponenttien erottelutavoissa ei ole kytkettynä minkäänlaista suodatusta, joten mikäli mittaussignaaleista on suodatettava yliaaltoja, niin se tulee tehdä erillisellä suodatuksella, joka aiheuttaa viivettä säätöön.

Synkronisessa koordinaatistossa symmetristen komponenttien erotteluun voidaan käyttää myös kaistanestosuodatusta, sillä myötä- ja vastakomponentit esiintyvät synkronisessa koordinaatistossa eri taajuuksilla. Kaistanestosuodatinta ei kuitenkaan otettu mukaan simulointeihin, sillä kaistanestosuodatusta käytettäessä signaaleissa mahdollisesti esiintyvien yliaaltojen suodatuksen tulisi lisätä erillinen suodatin. Kaksi peräkkäistä suodatinta aiheuttaisin niin suuren viiveen, että sillä ei todennäköisesti päästäisi hyviin tuloksiin. Tästä syystä tämä menetelmä rajattiin pois tarkasteluista.



Kuva 5.14. Epäsymmetrisen kuorman irtikytentä, kun symmetristen komponenttien erottelu on toteutettu synkronisessa vektorikoordinaatistossa. (a) Kuorman vaihevirrat, (b) TCR:n vaihevälikohtaiset virrat ja (c) verkon vaihevirrat.



Kuva 5.15. Epäsymmetrisen kuorman irtikytentä, kun symmetristen komponenttien erottelu on toteutettu synkronisessa vektorikoordinaatistossa. (a) Kuorman hetkellinen imaginäärinen teho ja (b) verkon hetkellinen imaginäärinen teho.

Näiden simulointien perusteella symmetristen komponenttien erotteluun valittiin stationäärisessä koordinaatistossa tapahtuva erottelu, joka perustuu luvun 5.1.2 yhtälöihin (28) ja (29), ja joissa ajanjakso τ saa arvon $100 \mu\text{s}$. Valinta perustui hyvään erottelukykyyyn staattisessa tilanteessa sekä nopeaan vasteaikaan. Synkronisessa koordinaatistossa samaan erottelukykyyhin tarvittaisiin hyvin pienen rajataajuuden omaavat alipäästösuodattimet, jolloin vasteaika kasvaisi liian suureksi.

6. SÄÄTÖJÄRJESTELMIEN REAALIAIKASIMULOINNIT

Reaaliaikasimuloinnilla tarkoitetaan simulointia, jossa simulointi etenee reaaliajassa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kaikki simulointiin tarvittava laskenta on ehdittävä suorittamaan simulointiin valitun aika-askelen sisällä. Reaaliaikasimulaattoreita käytetään nykyään monipuolisesti tekniikan alalla testaukseen, tuotekehitykseen ja opetukseen. Hyvin usein reaaliaikasimulointeja käytetään jonkin tietyn laitteen toiminnan tarkasteluun todellisessa ympäristössään. Tämän vuoksi reaaliaikasimulaattorit ovat yleensä yhteydessä todelliseen laitteeseen tai sen ohjausjärjestelmään. Itse laite suorittaa omaa toimintaansa ja simulaattorilla mallinnetaan toimintaympäristö. Sähkövoimatekniikan saralla reaaliaikasimulointia käytetään verkostosimuloinneissa muun muassa releiden ja erilaisten säädettävien komponenttien simulointeihin.

6.1. Simulointiympäristö

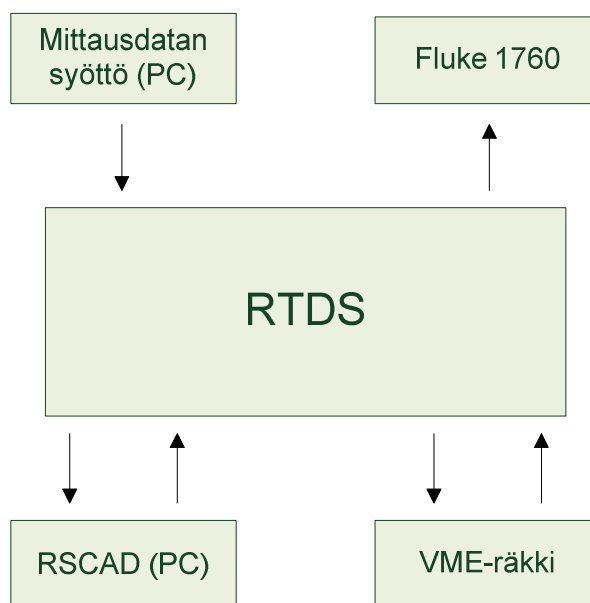
Tässä työssä SVC:n säätöjärjestelmän reaaliaikasimulointeihin käytettiin RTDS-simulaattoria. RTDS-simulaattorin lisäksi simulointeihin tarvitaan laitteet, joilla saadaan syötettyä halutut mittaussignaalit järjestelmään, säädettyä kompensattoria sekä tarkasteltua kompensattorin verkkovaikutuksia. Tämän lisäksi RTDS-simulaattoria tulee ohjata PC:llä RSCAD-ohjelmalla.

6.1.1. Simulointilaitteisto

Simulointiympäristö koostuu RTDS-räkidestä, SVC:n säätöjärjestelmästä, kahdesta PC-tietokoneesta sekä sähkönlaatumittarista. Kuvassa 6.1 on esitetty signaali-kaavio simulointiympäristöstä. RTDS-räkki (kuvassa keskellä) suorittaa varsinaista simulointia. Alempi PC-kone on RTDS:n käyttämistä varten, eli siinä suoritetaan RSCAD-ohjelmaa ja ylempi PC-kone syöttää valokaariuunin mittaussaineistoa RTDS-räkkiin. SVC:n säätöjärjestelmä, eli VME-räkki lukee RTDS-räkiltä kuorman virrat ja jännitteet sekä PCC:n jännitteen ja lähettää RTDS:lle tyristoriventtiilien liipaisupulssit. Sähkönlaatumittari Fluke 1760 mittaa PCC:n virrat ja jännitteet tulosten analysointia varten.

Kommunikointi RTDS:n ja muiden siihen liitettyjen laitteiden välillä tapahtuu kolmella eri tavalla. RSCAD-PC ja Fluke kommunikoivat RTDS:n kanssa ethernet-verkon välityksellä. VME-räkki lähettää tyristorien liipaisupulssit RTDS:lle optisesti, mutta ottaa vastaan kuorman ja PCC:n mittaustiedot analogisesti. Myös mittaustietojen syöttö RTDS:ään toiselta PC-koneelta suoritetaan analogisesti. Signaalireiteissä häiriöille alttiit kohdat ovat analogisesti siirretyt signaalit, sillä analogiset signaalit voivat häiriintyä

muun muassa loistevalaisimista, ellei käytössä ole hyvin häiriösuojattua kaapelia. Näissä simulointijärjestelyissä analogisissa signaaleissa ei havaittu häiriöitä, jotka vaikuttasivat merkittävästi simuloinneista saataviin tuloksiin.



Kuva 6.1. Signaalikaavio RTDS-simulointiympäristöstä.

Analogisen tiedonsiirron yhteydessä jouduttiin kiinnittämään huomiota signaalin muunnoksiin analogisesta digitaalseksi ja digitaalsesta analogiseksi. Ensimmäinen lenkki muunnosketjussa on valokaariuunin jännitteiden ja virtojen mittaaminen, jossa analoginen signaali muutetaan digitaaliseen muotoon. Tässä muunnoksessa näytteistystaajuus on toisella mittausaineistolla 1600 Hz ja toisella aineistolla 3200 Hz. Nyquistin näytteistysteoreeman mukaan jatkuvan signaalin näytteistys tulee tehdä taajuudella, joka on vähintään kaksi kertaa suurempi kuin signaalissa esiintyvä suurin taajuus. Eli teoreeman mukaan 1600 Hz:n taajuudella näytteistetyssä signaalissa suurimmat esiintyvät taajuuksien saavat olla enintään 800 Hz:n suuruista. Mikäli korkeampia taajuuksia esiintyy, pitää ne suodattaa pois signaalista ennen näytteistämistä, koska ilman suodattamista signaalit laskostuvat alemmille taajuuksille, ja saatu mittausaineisto ei ole enää todenmukainen. Tätä laskostumisilmiötä kutsutaan nimellä *aliasing*, ja sen estämiseen käytettävää suodattamista kutsutaan yleisesti *anti-aliasing* -suodatukseksi. Vastaavaa suodatusta tarvitaan myös muunnettaessa digitaalista signaalia analogiseksi, jotta näytteistystaajuudella tapahtuva porrastus saadaan poistettua analogisesta signaalista. [29]

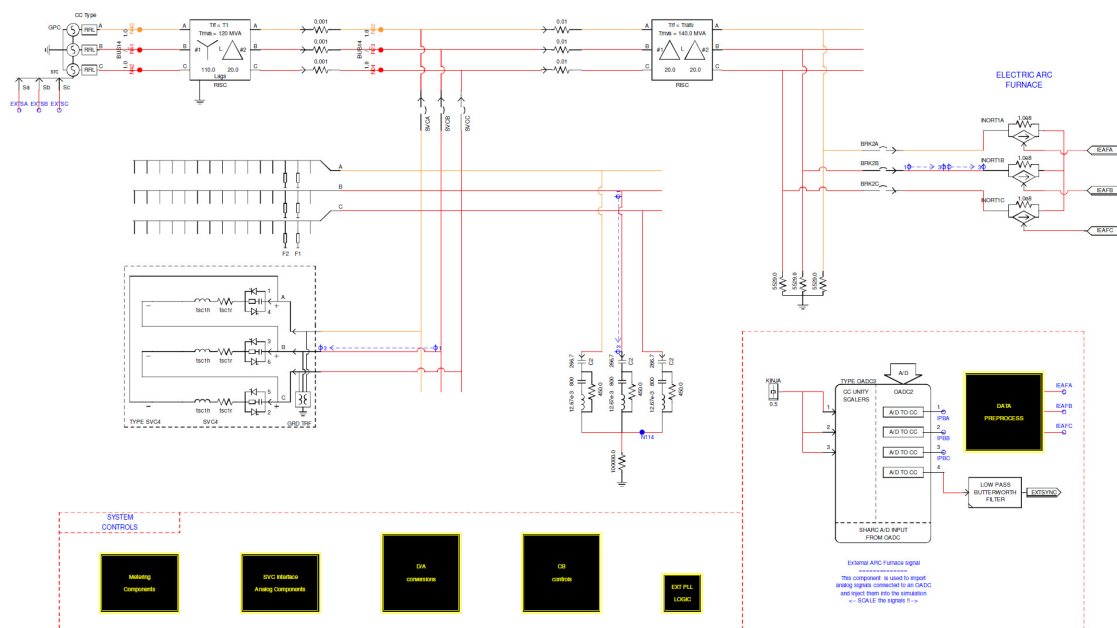
Tehdyissä simuloinneissa huomattiin, että mittausaineisto tuli suodattaa myös RTDS:ssä, vaikka varsinaiset muunnokset analogisesta digitaaliseen olivat jo tapahtuneet. Mittausaineiston näytteistystaajuus näkyi hyvin voimakkaana RTDS:ssä ja RTDS:n ja VME-räkin välisellä signaalireitillä näytteistystaajuuden aiheuttama särö vain voimistui. VME-räkissä on *anti-aliasing* -suodatus, mutta suodatuksen rajataajuus on mittausaineistojen näytteistystaajuutta suurempi, eikä siten poistanut ongelmaa. Tämän vuoksi RSCAD-malliin piti lisätä erillinen syötettävien mittausaineistojen suodatus,

jotta kvantisointikohinasta päästiin eroon. Nyquistin teoreeman mukaisesti suodatuksella pyrittiin suodattamaan kaikki taajuudet, jotka olivat korkeampia kuin näytteistystaajuuden puolikas. Käytännössä suodatus toteutettiin 800 Hz:n ja 1500 Hz:n rajataajuuden Butterworth alipäästösuodattimilla riippuen syötettävien mittaussignaalien näytteistystaajuudesta. Suodattimet suodattivat kvantisointikohinan pois lähes kokonaan, mutta eivät juuri vaimentaneet mittaussignaaleissa esiintyviä yliaaltoja. Näin mittaussignaali säilyi todenmukaisena, ja vain signaalin käsittelystä johtuva kohina saatiin suodatettua pois. Simuloinneissa saadut tulokset voisivat vielä parantua, mikäli kvantisointikohinan särön saisi suodatettua kokonaan pois. Suodatus ei kuitenkaan saisi vaikuttaa uunivirran yliaaltoihin, sillä yliaaltojen vaimentuminen parantaa SVC:n säätöalgoritmien toimivuutta. Edellä mainittuja suodattimia valittaessa tämä otettiin huomioon ja suodattimet pyrittiin valitsemaan siten, että tulokset olisivat mahdollisimman hyvin reaalityönnön vastaavia.

Simuloinneissa tuli ottaa huomioon myös signaalireiteillä syntyvät viiveet. Viiveitä syntyy sekä RTDS:ssä että VME-räkissä, sillä molemmilla on äärellinen ohjelman kiertoaika. Tämä viive on kompensoitavissa SVC:n ohjelmakoodissa liipaisuajankohdan aikaistamisella. Normaalityönnössä viiveen tulisi olla simulointimallin aika-askeleen suuruinen, joka näihin simulointeihin oli valittu 50 mikrosekunnin suuruiseksi. Kuitenkin ajettaessa verkkomallia, joka suoritettiin kahdella erillisellä RTDS-räkillä, viiveen suuruus oli noin nelinkertainen, eli noin 200 μ s. Selitys viiveen kasvamiselle lieene kahden rakin kommunikointiin tarvittava aika. Simulointimalli pyrittiin järjestelemään siten, että mallin eri osien suorittaminen kulkisi loogisessa järjestyksessä RTDS:n prosessorien välillä niin, ettei turhaa prosessorien välistä muuttujien siirtoa ei tapahtuisi. Tätä lisäviivettä ei kuitenkaan saatu poistettua, joten mallia kevennettiin yhdelle RTDS-räkille sopivaksi, sillä yhdessä räkissä tapahtuvissa simuloinneissa viive oli odotetunlainen.

6.1.2. Simulointimalli

RSCAD:issä mallinnettu verkkomalli on kuvattu kuvassa 6.2, jossa verkkoa syötetään kolmivaiheisella 110 kV:n jännitelähteellä, jonka oikosulkuteho on valittavissa halutunlaiseksi. Normaalisti jännitelähteestä poiketen sille on syötettävä erillinen synkronisointisignaali, jolla jännite synkronoidaan malliin syötettävään valokaariuunin virtaan. Eroa myös RSCAD-simuloinneissa käytettyyn malliin on virran injektointilohko, jolla valokaariuunin mittaussignaali syötetään malliin. Syötettävän virran voimakkuutta voidaan säädellä halutuksi erillisellä vahvistuksella. SVC:n teho määriteltiin 100 MVar:ksi ja TCR mitoitettiin 125 MVar:n suuruiseksi, jotta SVC pystyisi tarvittaessa kompensoimaan paremmin kuormituksen epäsymmetriaa. SVC:n rinnalle kytketyt suodatinparistot ovat teholtaan kaikki yhtä suuria, eli noin 33,5 MVar. Toisen yliaallon suodatin on simulointimallissa erillisenä, sillä RSCAD:in valmiista toimilohkoista ei löytynyt halutunlaista laajakaistasuodatinta. Kolmannen ja neljännen yliaallon suodattimet ovat omassa toimilohkossaan.



Kuva 6.2. RTDS-simuloinneissa käytetty verkkomalli.

6.2. Säästöjärjestelmien VME-toteutukset

Molempien käytettyjen säätöjärjestelmien VME-toteutusten pääosiot ovat signaalien suodattaminen, susceptanssiohjeiden laskenta sekä sopivan TCR:n liipaisuohjeen laskeminen. Tyristoriventtiilien liipaisuohjeiden laskennassa käytettiin molempien säätöjärjestelmien kanssa samaa toteutusta, koska siihen ei tarvinnut tehdä muutoksia säätöjärjestelmän optimoinnin yhteydessä. Susceptanssiohjeiden laskenta toteutettiin aikaisemmin esitetyillä tavoilla, mutta laskentaan lisättiin parametrit, jotka ottavat huomioon virtamuuntajien muuntosuhteen, TCR:n maksimitehon sekä RTDS:n laskentaviiveen. Molemmille säätösovelluksille oli myös etsittävä sopiva suodatus käytettäväksi simuloinneissa.

Ensimmäisenä määritettiin RTDS:n aiheuttama liipaisukulman virhe ohjaamalla tyristorit säätösovelluksessa täysin johtavaan tilaan, jonka jälkeen tyristorien liipaisuviive tarkistettiin RSCAD:in kuvaajista. Viiveen suuruudeksi saatiin yksi simuloinnin aika-askel, eli 50 μ s. Liipaisuviive tarkistettiin myös muilla liipaisukulmilla mittaamalla oskilloskoopilla VME-räkin lähettämä liipaisuajankohta ja tarkistamalla tyristorien syttymisajankohta RSCAD:stä. Määrittelyjen perusteella viivettä kompensoitiin aikaistamalla liipaisuimpulssia 1° verran, joka aikana vastaa 55 μ s:a.

Seuraavaksi tarkistettiin susceptanssilaskennan ja TCR:n perustehon skaalausker-
toimet. Skaalauskerroimet määritettiin laskemalla ja ne tarkastettiin simuloinneilla 0
MVar:n, 42 MVar:n ja 90 MVar:n induktiivisia staattisia kuormia käyttäen. Simu-
loinneissa tarkistettiin poikkeako kuorman ja SVC:n yhteenlaskettu loisteho nollassa.
Molempien säätösovellusten toimintakäyrät olivat samanlaisia. Kuorman ollessa nollassa
myös yhteenlaskettu loisteho oli nolla, 42 MVar kuormalla yhteenlaskettu loisteho
oli noin 0.4 MVar:ia induktiivinen ja 90 MVar kuormalla yhteenlaskettu loisteho oli

noin 0,9 MVar:ia kapasitiivinen. Säättösovellusten suurin poikkeama toiminta-alueella on siis noin 1 %. Toiminta-alueiden yhteneväsyydestä johtuen poikkeaman arveltiin johtuvan linearisointirampista, eikä säättösovellusten laskentavirheestä. Tästä syystä säättösovelluksille laskettuihin parametreihin ei tehty korjauksia, eikä virheen pienuudesta johtuen muutoksien tekoa linearisointiramppiin myöskään nähty järkeväksi.

Säättösovelluksille sopivan suodatuksen etsiminen vaati parametrintia enemmän simuloiteja, koska kummallekin säättösovellukselle pyrittiin löytämään paras suodatus molempia simuloitavia mittausaineistoja varten. Suodattimina käytettiin Chebychev 1 ja elliptisiä alipäästösuodattimia. Suodattimien suunnittelu tapahtui Matlabin filter design and analysis -työkalulla. Suodattimien vertailussa tärkeimpänä kriteerinä oli flikkeriarvojen suuruus. Flikkeriarvoja vertailtiin suorittamalla samat simuloinnit useilla eri suodattimilla ja näiden perusteella valittiin kompensointituloksiltaan parhaat suodatukset, joita käytettiin varsinaisissa simuloinneissa.

Suodattimissa oli parametreina rajataajuus, päästökaistan rippeli ja elliptisellä suodattimella myös estokaistan vaimennus. Näytteistystaajuus suodattimissa oli VME-räkin kellotaajuus, eli 10 kHz. Rajataajuuksia muutettiin 100 Hz:stä aina 150 Hz:iin kymmenen Hz:n välein ja päästökaistan rippeli pidettiin ensin 1 dB suuruisena, jotta suodattimen vaimennuskäyrä laskisi voimakkaammin. Kuitenkin parhaat tulokset saavutettiin 0,5 dB päästökaistan rippelillä. Elliptisten suotimien estokaistan vaimennusta haarukoiitiin 10 dB, 15 dB ja 20 dB vaimennuksilla ja simulointien perusteella 15 dB:n estokaistan vaimennus todettiin juuri ja juuri riittäväksi. 20 dB:n estokaistan vaimennusta ei valittu, sillä tällöin suodattimen vaimennuskäyrä oli loiventunut.

Tehdyissä simuloinneissa todettiin, että elliptisellä suodattimella saadaan parempia tuloksia kuin Chebychev 1 -suodattimella. Kummankin säättösovelluksen tapauksessa tulokset olivat tämän osalta yhteneviä. Säättösovellusten erot tulivat esiin sopivan rajataajuuden määrittämisessä elliptiselle suodattimelle. Parhaan tuloksen saavuttamiseksi vaihekääntöön perustuvalle säädölle tuli asettaa suuremman rajataajuuden omaava suodatus kuin vektorisäädölle. Vektorisäädöllä saavutettiin parhaat tulokset, kun suodattimen rajataajuus oli 110 Hz. Vaihekääntöön perustuvan säädön tapauksessa Avestan testiaineistoa käytettäessä suodattimen rajataajuus tuli asettaa 130 Hz:iin. Käytettäessä Severskyn testiaineistoa paras tulos sen sijaan saavutettiin, kun signaaleja ei suodatettu lainkaan. Syynä tähän on oletettavasti Severskyn aineiston hyvin nopeat tehon muutokset, jolloin suodatus heikentää suorituskykyä kasvaneen viiveen myötä. Vektorisäädön tapauksessa alhaisen rajataajuuden tarve selittyy vektorisäädön heikosta yliaaltojen sietokyvystä, jonka vuoksi ne tulee suodattaa signaaleista mahdollisimman hyvin. Simuloinneissa käytetyistä testiaineistoista kerrotaan lisää seuraavassa alaluvussa.

6.3. RTDS-simuloinnit

RTDS-simuloinneissa vertailtiin SVC:ssä tällä hetkellä käytettävää säätöjärjestelmää ja kehiteltyä uutta vektoripohjaista säätöjärjestelmää. Simuloinneissa keskityttiin säätöjärjestelmien dynaamisten ominaisuuksien vertailuun, eli päähuomio keskittyi välkynnän

vaimennukseen. Testeissä käytettiin kahden eri valokaariuunin mittaussaineistoa, jotta säätöjärjestelmien käyttäytymistä voitiin vertailla erilaisilla valokaariuuneilla. Ensimmäinen aineisto on mitattu Seversky Tube Works'in valokaariuunilta Venäjältä ja siinä valokaariuuni käyttäytyy hyvin rauhattomasti ja sen aiheuttama flikkeri on korkealla tasolla. Severskyn aineisto vastaakin hankalaa kuormaa. Toinen aineisto on mitattu Ruotista Outokumpu Oy:n Avestan terästehtaalta ja se vastaa hyvin tyypillistä valokaariuunin mittaussaineistoa. Avestan aineiston flikkeritaso on matalampi kuin Severskyn ja se vastaakin normaalia kuormaa. Molemmat mittaussaineistot ovat valokaariuunin sulatuksen alkuvaiheesta, jolloin uunin käytös on rauhattomampaa kuin sulatuksen loppuvaiheessa. Yhden simuloinnin pituus on käytettäessä Severskyn aineistoa noin 13 minuuttia ja Avestan aineistoa noin 15 minuuttia.

Aineistoilla simuloitiin tilanteet, joissa syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi oli pieni ja suuri. Pienen oikosulkuimpedanssin arvoksi valittiin $3,27 \Omega$, jolloin 110 kV jännitteellä verkon oikosulkutehoksi tulee 3700 MVA. Suureksi verkon impedanssiksi valittiin $12,1 \Omega$, joka vastaa oikosulkutehona 1000 MVA:ia. Päämuuntajan nimellisteho oli 120 MVA ja oikosulkureaktanssi oli 12 %:ia. Arvot valittiin todellisten muuntajien mukaisiksi. Mielenkiinnon vuoksi aineistoilla simuloitiin myös tilanteet, joissa päämuuntajan reaktanssi oli vain 1 %. Tämä tapaus ei vastaa käytäntöä, mutta tällä simuloinnilla pyrittiin selvittämään, mikä vaikutus pätötehon vaihtelulla on flikkerilukemiin ja flikkerin vaimennukseen.

Jokainen simulointi suoritettiin kolme kertaa. Ensimmäisessä simuloinnissa valokaariuunia ajettiin, kun SVC:stä oli kytkettynä ainoastaan toisen yliaallon suodatin. Tästä simuloinnista saatiin jokaiselle tapaukselle oma flikkerin referenssiarvo, johon kompensoitujen tapausten flikkerilukemia vertailtiin. Suodatin on kytkettynä valokaariuunin rinnalle, jotta jännite ei putoaisi kesken sulatuksen ja pienentäisi myös uunin ottamaa tehoa, koska tehon pudotessa myös flikkeri olisi pienempää, eikä simuloinneista saataisi totuudenmukaisia arvoja. Toiseksi sama simulointi ajettiin SVC:llä, jossa oli kaikki suodatinparistot kytkettyinä ja säätösovelluksena vaihekääntöön perustuva säätö. Kolmantena simulointi suoritettiin SVC:llä, jossa säätösovelluksena oli vektorisäätö. Myös tässä tapauksessa kaikki suodatinparistot olivat kytkettyinä. Simuloinneissa flikkeriarvot mitattiin aina PCC:n jännitteestä.

Välkyntäarvojen vertailuun käytettiin $P_{st}(95)$ -arvoa. Flikkerin arvo laskettiin simulointituloksista asettamalla kaikki saadut flikkerilukemat suuruusjärjestykseen ja laske-
malla niistä arvo, jonka alle 95 % lukemista sijoittuu. Lukemia ei siis tarkasteltu vaihekohtaisesti ja tällä pyrittiin saamaan vertailukelpoisempia tuloksia, koska kompensoimaton flikkeri vaihteli vaihekohtaisesti hyvinkin paljon. Näin myös kuorman korkeimmat flikkeripiikit otettaisiin huomioon laskennassa. Tulosten analysoinnissa käytettiin Fluken PQ Analyze ja Microsoft Excel -ohjelmistoja.

6.3.1. Hankala valokaariuuni

Ennen varsinaisia simulointeja uunivirralla piti vielä etsiä sopiva vahvistus, eli etsiä SVC:lle optimi kompensointiaste. Kompensointiaste tarkoittaa kuormassa esiintyvän suurimman loistehon ja SVC:n tehon suhdetta. Tämän suhteen määrittämiseksi suoritettiin useita simulointeja eri kuormavirran vahvistuksilla ja niistä valittiin kompensointituloksiltaan paras. Severskyn aineistolla paras kompensointiaste löytyi, kun kuorman loistehon keskiarvo oli noin 25 MVar. Keskiarvo ei kuitenkaan kerro koko totuutta, sillä aineistossa esiintyy suuria hetkellisiä loistehopiikkejä, jonka vuoksi SVC tulee olla melko suuritehoinen parhaan kompensointituloksen aikaan saamiseksi. Severskyn aineistossa esiintyy myös paljon kaksivaiheisia oikosulkutilanteita, jolloin kuorman balansoimiseksi SVC:n yhden vaiheen loistehon tulee riittää kattamaan myös tämä tilanne.

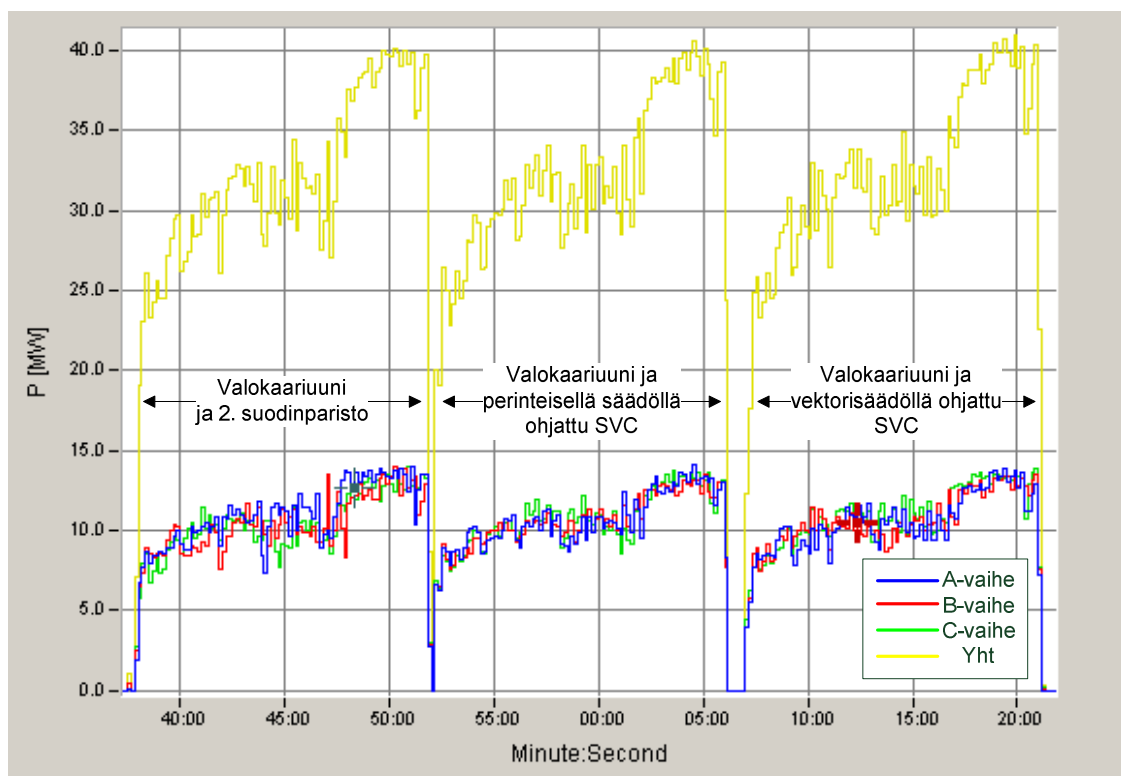
Simuloinnit vahvalla verkolla

Kuvassa 6.4. on esitetty valokaariuunin ottamasta pätötehosta kuvaajat kolmen eri simuloinnin aikana. Ensimmäinen sykli kuvaa tilannetta, jossa valokaariuunin rinnalle on kytketty ainoastaan toisen yliaallon suodatinparisto. Keskimmäinen käyrämuoto kuvaa tilannetta, jossa valokaariuunia kompensoidaan vaiheenkääntöön perustuvalla SVC:llä. Kolmannessa tapauksessa valokaariuunia kompensoidaan SVC:llä, jossa käytetään vektorisäätöön perustuvaa säätötapaa. Verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan oikosulkureaktanssi on 12 %.

Kuvassa sininen väri kuvaa A-vaiheen, punainen B-vaiheen ja vihreä C-vaiheen pätötehoa. Lisäksi kuvaan on piirretty keltaisella kolmen vaiheen yhteenlaskettu pätöteho. Selkeyden vuoksi jatkossa kaikissa kuvissa käytetään samoja vaihekohtaisia värimerkintöjä. Värimerkintöjä ei ole enää merkitty kuviin, vaan ne ovat esitetty kuvassa 6.3. Värimerkinnät koskevat kaikkia kuvia suureista riippumatta.

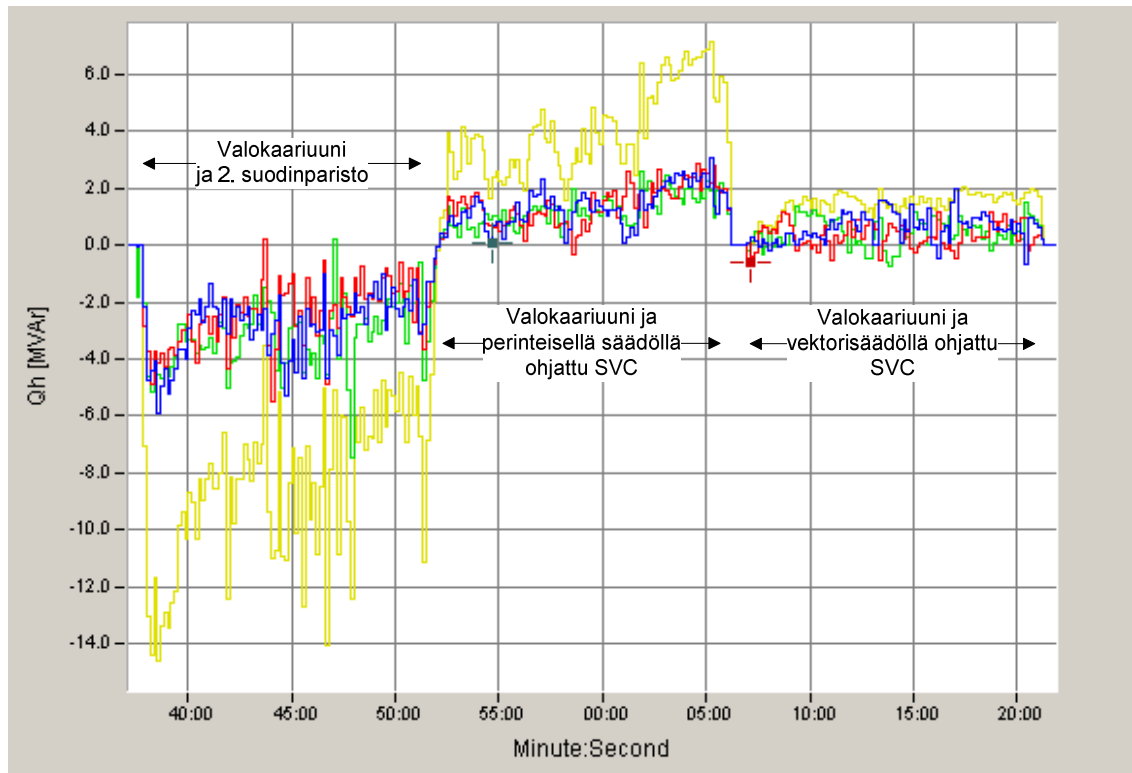


Kuva 6.3. RTDS-simulointien kuvissa käytetyt vaihekohtaiset värimerkinnät.

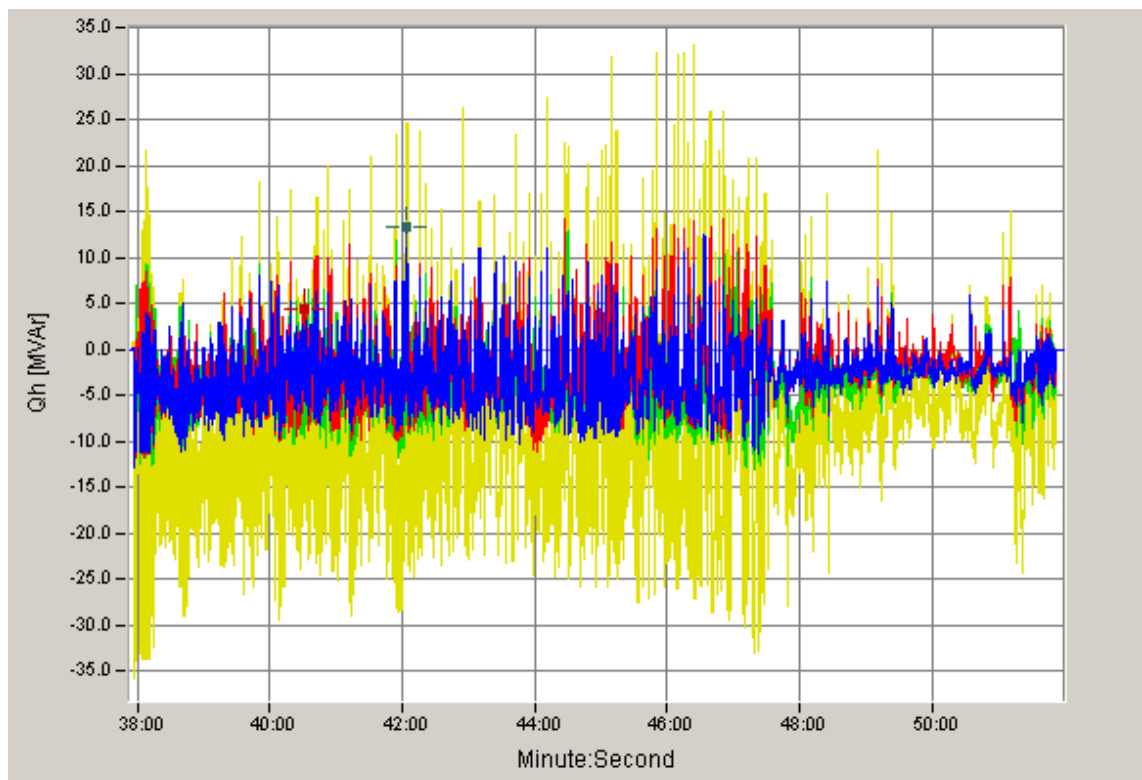


Kuva 6.4. Valokaariuunin pätötehoprofiilit 10 s keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa. Ensimmäisessä valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, toisessa tapauksessa uunin rinnalle on kytketty nykyistä säätötapaa käyttävä SVC ja kolmannessa tapauksessa vektorisäätöön perustuva SVC.

Valokaariuunin loistehoprofiili samasta tilanteesta on esitetty kuvassa 6.5, jossa negatiivinen loisteho tarkoittaa kapasitiivista loistehoa. Kuvaa tarkastellessa on huomattava, että loistehoprofiili on piirretty kuvaan 10 s keskiarvostuksella. Tästä syystä valokaariuunin ja toisen suodatinpariston loisteho on kapasitiivista koko sulatuksen ajan. Kuvassa 6.6 on esitetty valokaariuunin ottamasta loistehosta 200 ms keskiarvostusta käyttäen piirretty kuvaaja, kun uunin rinnalla on toinen yliaaltosuodatin. Kuvasta nähdään, että välillä yhden vaiheen loisteho käy lähes 15 MVar:ssa. Pelkän valokaariuunin yhden vaiheen loisteho voidaan laskea lisäämällä kuvaajan loistehoon toisen yliaaltosuodattimen yhden vaiheen loisteho, 11,1 MVar, jolloin yhden vaiheen loistehon suurimmaksi arvoksi saadaan noin 26 MVar. On kuitenkin vielä huomattava, että kyseessä on edelleen kymmenen verkkojakson keskiarvo, jolloin yksittäisten verkkojaksojen huipputehot voivat olla vieläkin suurempia. Tämän vuoksi kompensointiaste vaikuttaa liian korkealta, vaikka se onkin optimoitu.



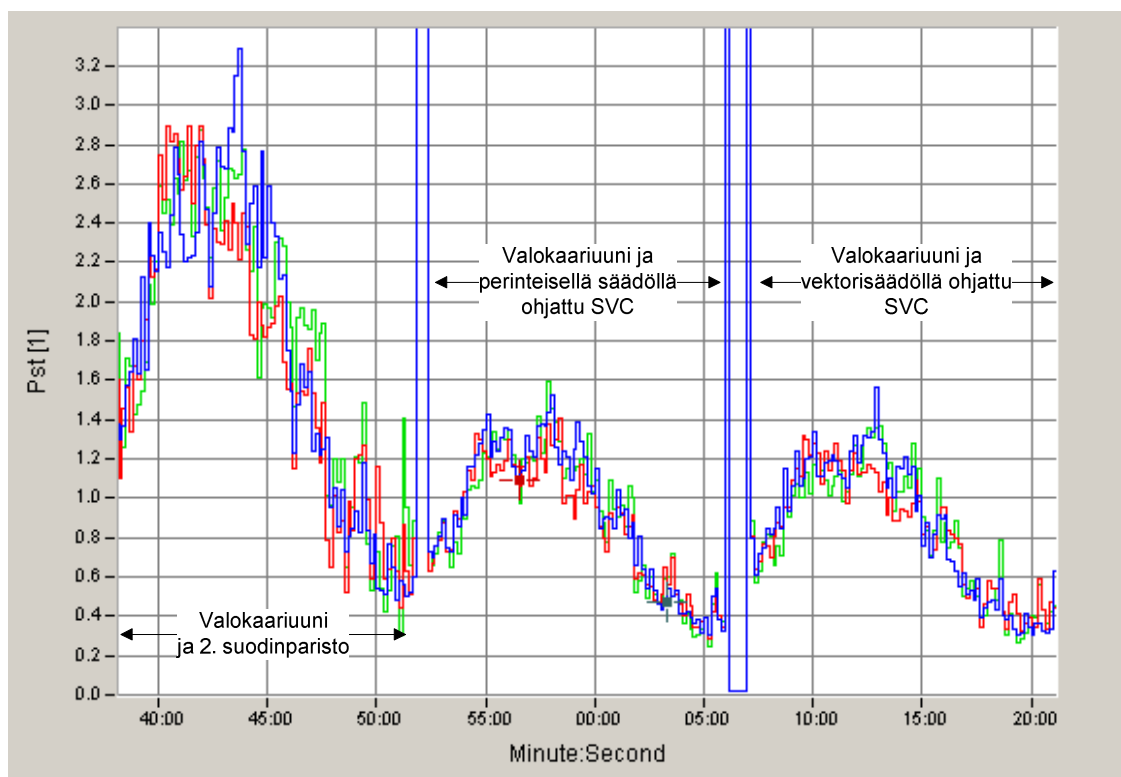
Kuva 6.5. Valokaariuunin loistehoprofiilit 10 s keskiarvostuksella, kun uunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, nykyisellä säätösovelluksella toteutettu SVC ja vektorisäätöön perustuva SVC.



Kuva 6.6. Valokaariuunin ja toisen yliaallon suodattimen rinnankytkennän loistehoprofiili 200 ms keskiarvostuksella.

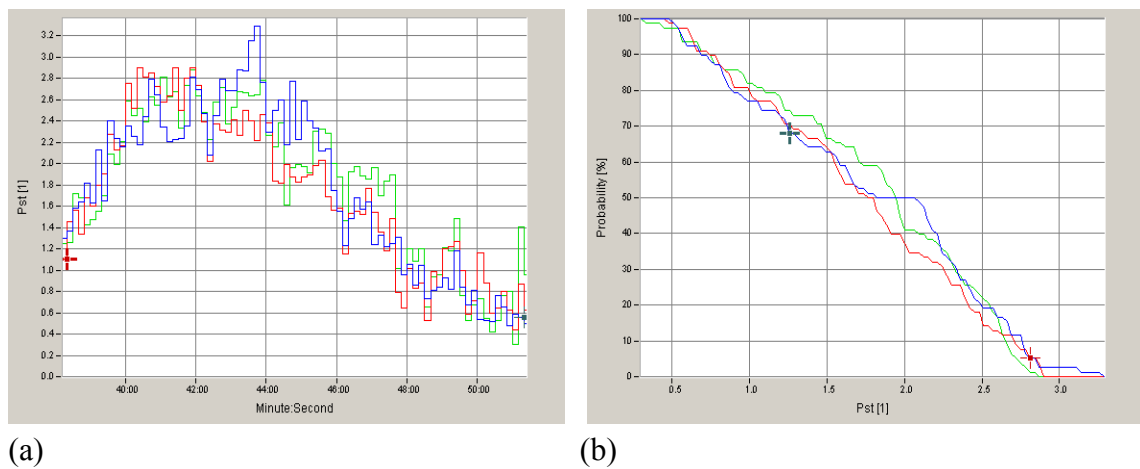
Kuvan 6.5 loistehoprofiilin perusteella vektorisäädöllä toteutetun SVC:n kompensoiman valokaariuunin loisteho pysyy lähes samalla tasolla koko sulatuksen ajan, jolloin kokonaisloistehon vaihtelu on enimmillään 2 MVar. Vaiheenkäntöön perustuvan säädön kanssa loistehon vaihtelu on suurempaa, noin 6 MVar. Jäännösloistehon taso on vektorisäädöllä hieman alle 2 MVar, mikä johtuu säätöjärjestelmän viiveestä ja epätasaisuudesta. Vaiheenkäännöllä jäännösloistehon keskiarvo on selvästi korkeampi. SVC:ssä jäännösloistehon kompensointi toteutetaan tavallisesti takaisinkytketyllä säädöllä, joka näissä simuloinneissa ei ollut käytössä.

Sulatusten aikaiset flikkeriprofiilit löytyvät kuvasta 6.7. Profiilit ovat tyypillisiä sulatuksen alkuvaiheelle, jolloin valokaariuunin käyttäytyminen on rauhatonta. Alkuvaiheessa flikkeri kasvaa, kunnes sulatuksen loppua kohti se alkaa hiljalleen pienentyä. Profiileista nähdään, että vektorisäädöllä flikkeri vaimenee hieman enemmän kuin vaiheenkäntöön perustuvalla säädöllä. Kompensoimattomassa tapauksessa näkyvä korkea piikki näkyy kuitenkin myös vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä kompensoidussa tilanteessa, mutta vaiheenkäntöön perustuva säätö pystyy kompensoimaan sen melko hyvin pois. Kyseisessä kohdassa kuormituksessa tapahtunee hyvin nopeita ja suuria loistehon muutoksia, jolloin säädön sisäisen mittaussignaalien suodatuksen aiheuttaman viiveen vuoksi vektorisäätö ei ehdi reagoida tilanteeseen riittävän nopeasti. Vaiheenkäntöön perustuvalla säädöllä suodatusta ei kuitenkaan ole, joten se ehtii mukaan nopeimpiinkin loistehon vaihteluihin.



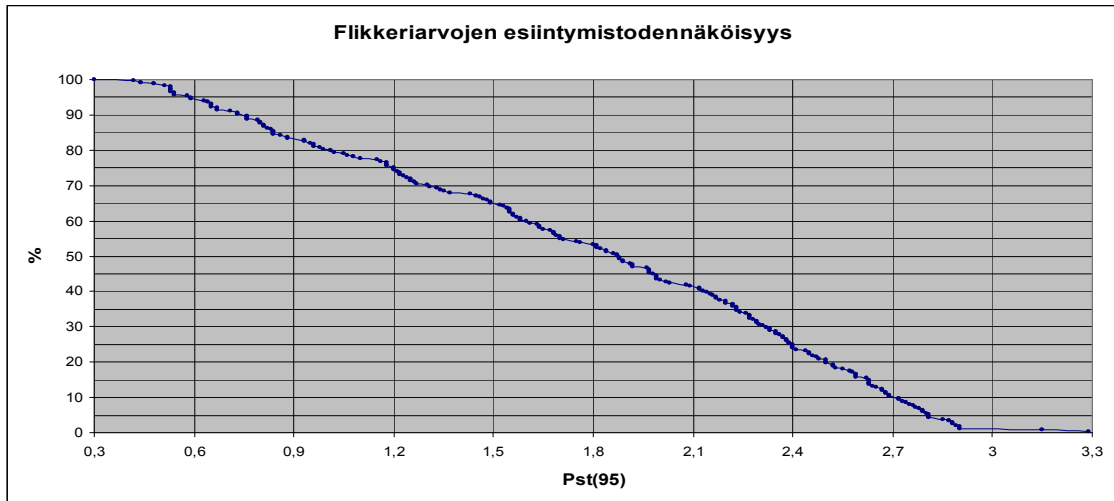
Kuva 6.7. PCC:stä mitatut valokaariuunin flikkeriprofiilit 10 s keskiarvostuksella, kun uunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, nykyisellä säätösoveluksella toteutettu SVC ja vektorisäätöön perustuva SVC.

Välkyntätasojen määrittystä varten jokaisesta simulointitapauksesta tehtiin todennäköisyysjakauma, jonka perusteella välkyntän tasoa pystyi tarkastelemaan tarkemmin. Kuvassa 6.8 on esitetty valokaariuunin ja toisen yliaaltosuodattimen flikkeriprofiili sekä flikkerin todennäköisyysjakauma. Todennäköisyysjakauman perusteella flikkerin $P_{st}(95)$ -tasoa on hankala määrittää tarkasti, sillä vaihekohtaiset flikkeriarvot vaihtelevat. Vaihekohtaisten flikkeriarvojen keskiarvostus olisi yksi tapa selvittää 95 %-taso, mutta tällöin merkittävästi vaikuttavien yksittäisten piikkien merkitys vähenisi ja tällä tavalla olisi luultavasti saatu huonompia välkyntän vaimennustuloksia, kuin mitä ne todellisuudessa ovat.



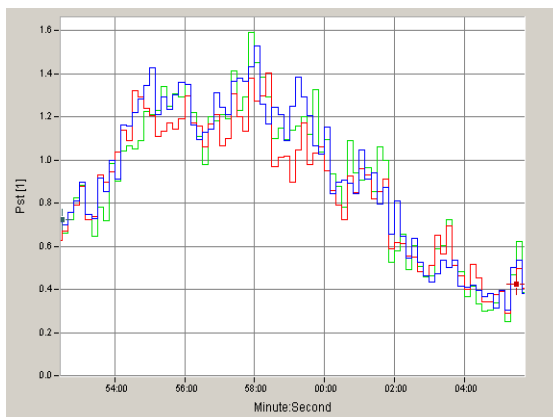
Kuva 6.8. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma.

Flikkeritasojen tarkempi analyysi suoritettiin käyttäen Microsoft Exceliä. Jokaisen simuloinnin flikkeriarvot siirrettiin Excel-taulukkoon. Tämän jälkeen kaikkien kolmen vaiheen flikkeriarvot laitettiin samaan tietueeseen, tietueen arvot asetettiin suuruusjärjestykseen ja tästä tietueesta laskettiin taso, jota pienempiä 95 % flikkerilukemista on. Valokaariuunin ja toisen yliaaltosuodattimen flikkerilukemista muodostetun tietueen todennäköisyysjakauma on esitetty kuvassa 6.9. Kuvaajasta voidaan määrittää $P_{st}(95)$ -arvoksi noin 2,8 ja tarkemmin laskemalla $P_{st}(95)$ -lukemaksi saadaan 2,81.

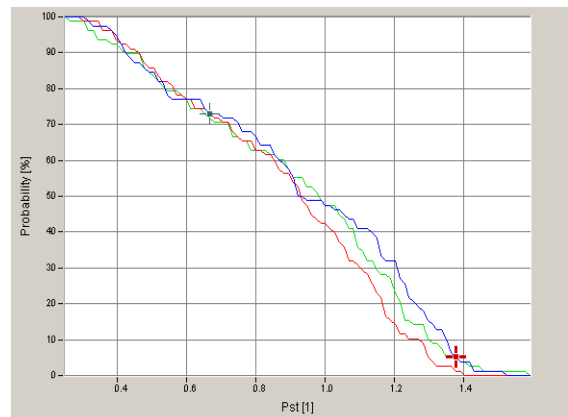


Kuva 6.9. Valokaariuunin ja toisen yliaallon suodatinpariston välkyntälukemien todennäköisyysjakauma.

Kuvassa 6.10 on esitetty flikkerin profiili ja todennäköisyysjakauma, kun valokaariuunia kompensoidaan vaihekääntöön perustuvalla SVC:llä. Edellisessä kappaleessa esitetyllä menetelmällä flikkerin $P_{st}(95)$ -arvoksi saatiin nyt 1,37.



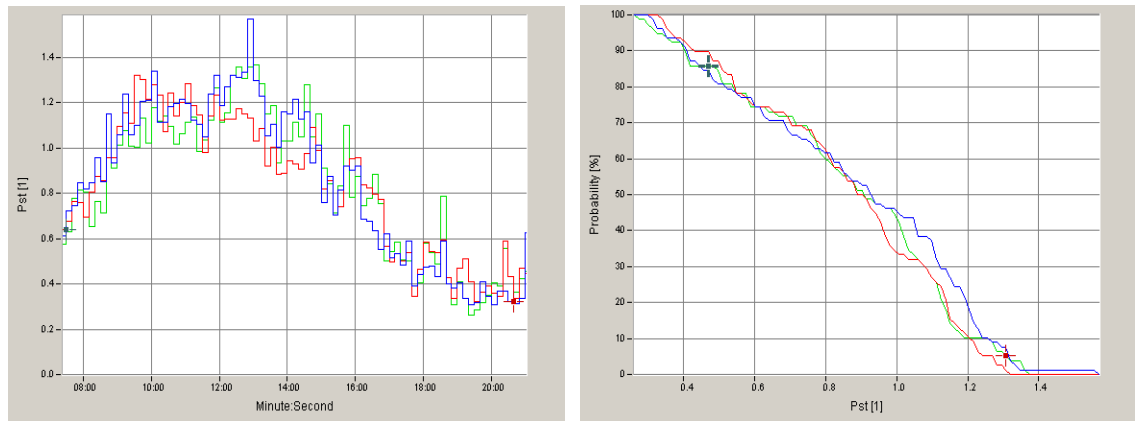
(a)



(b)

Kuva 6.10. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 1,37$.

Kuvassa 6.11 on esitetty vastaavat kuvaajat, kun valokaariuunia kompensoidaan SVC:llä, jossa on vektorilaskentaan perustuva säätötapa. Tässä tapauksessa flikkerin $P_{st}(95)$ -arvoksi saatiin 1,31.



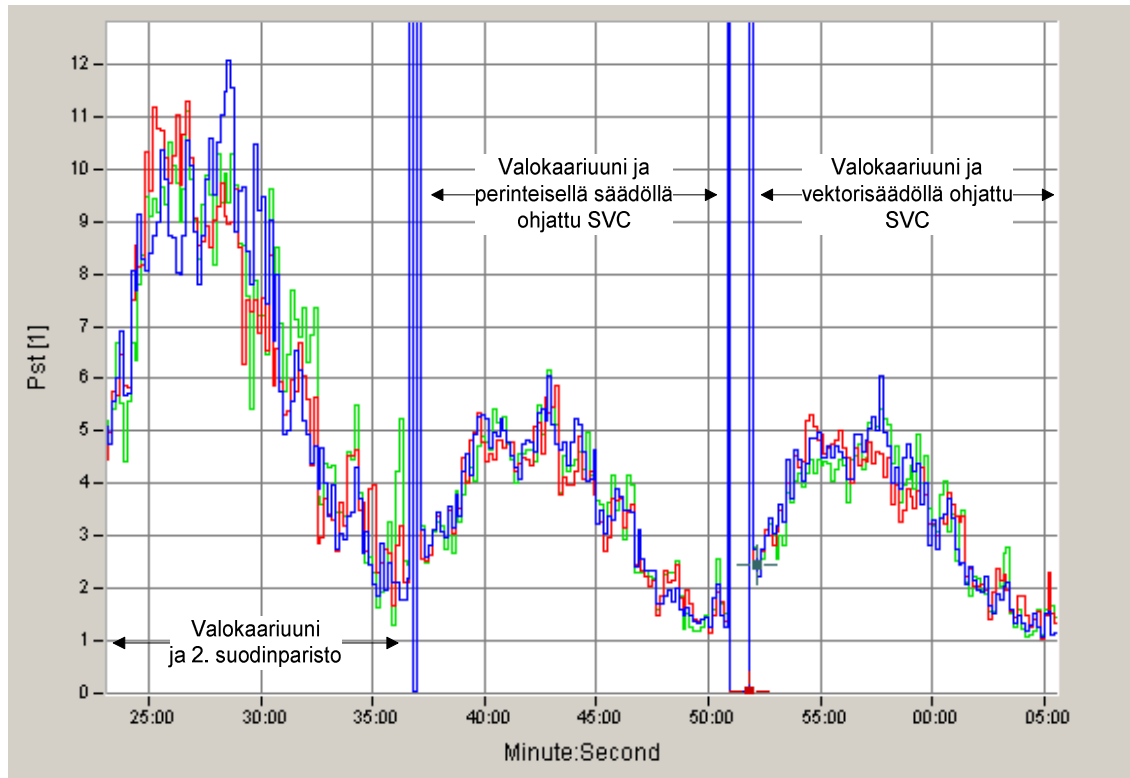
(a)

(b)

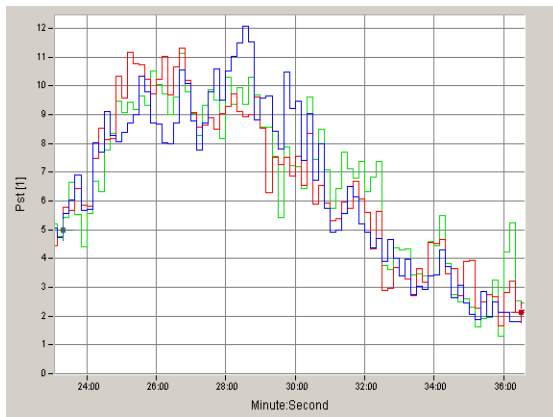
Kuva 6.11. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 1,31$.

Simuloinnit heikolla verkolla

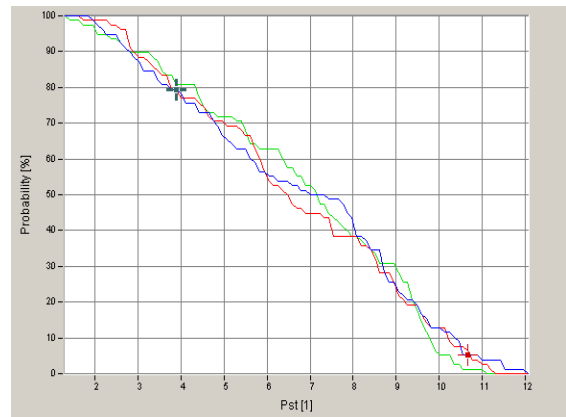
Heikon verkon tapauksessa verkon oikosulkuimpedanssi nostettiin 12,1 Ω :iin, jolloin verkon oikosulkuteho putosi 1000 MVA:iin. Pätö- ja loistehoarvoihin verkon oikosulkutehon muuttamisella ei ollut vaikutusta, mutta flikkeriarvot muuttuivat PCC:ssä huomattavasti. Kuvassa 6.12 on esitetty valokaariuunin flikkeriprofiilit toisen yliaallon suodattimen, vaihekääntöön perustuvan SVC:n ja vektorisäädön omaavan SVC:n tapauksissa. Kuvasta nähdään, että flikkeriarvot ovat PCC:ssä lähes neljä kertaa suuremmat heikolla verkolla kuin vahvalla verkolla. Eri tapausten flikkeriprofiilit ja todennäköisyysjakaumat on esitetty tarkemmin kuvissa 6.13-6.15.



Kuva 6.12. PCC:stä mitatut valokaariuunin flikkeriprofililit 10 sekunnin keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa: ilman aktiivista kompensointia, uunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja uunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä. Uunia syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 12 %.

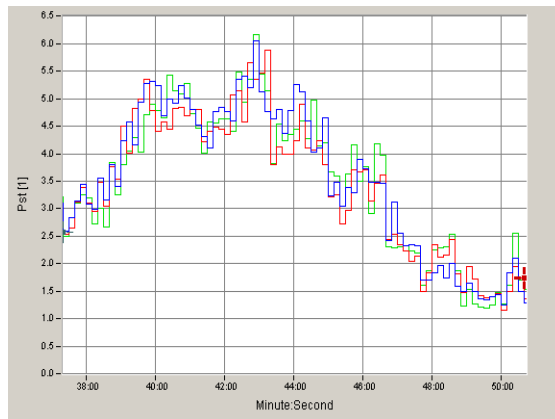


(a)

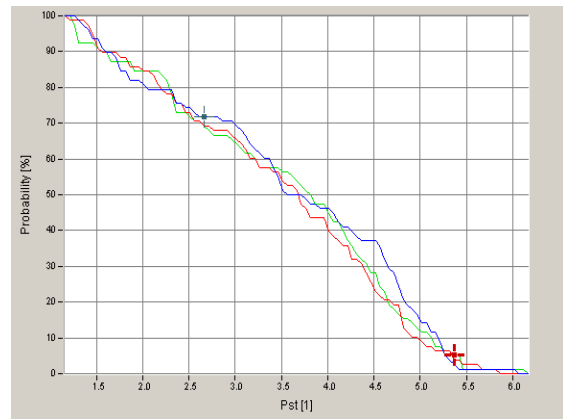


(b)

Kuva 6.13. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 10,58$.

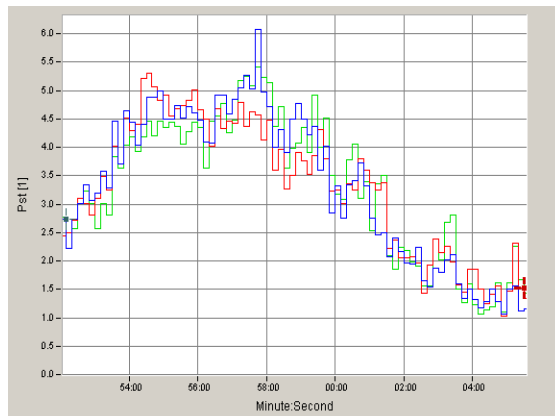


(a)

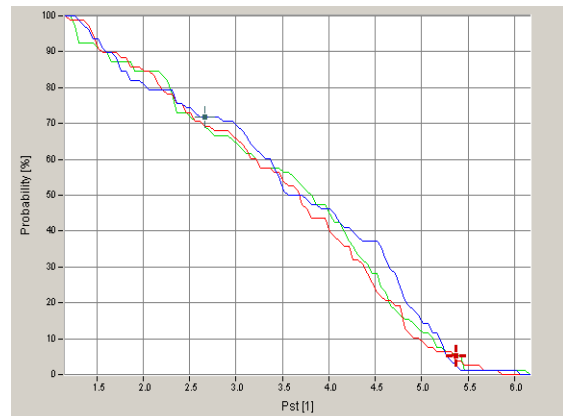


(b)

Kuva 6.14. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 5,35$.



(a)



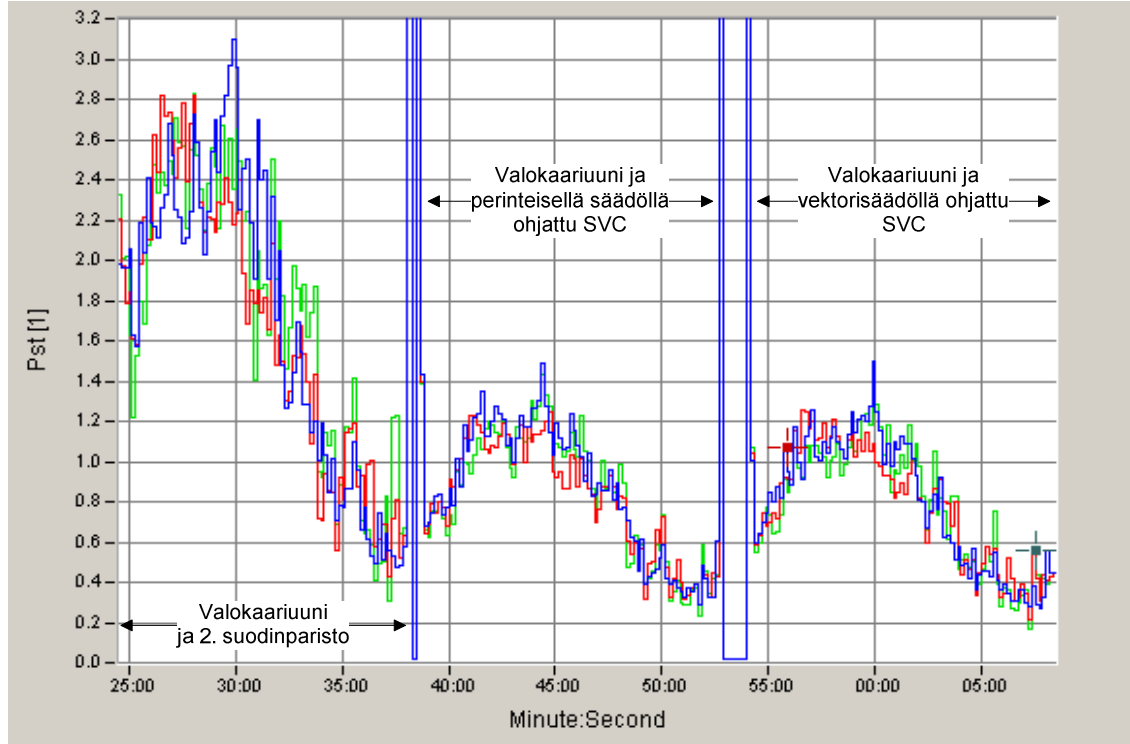
(b)

Kuva 6.15. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 5,05$.

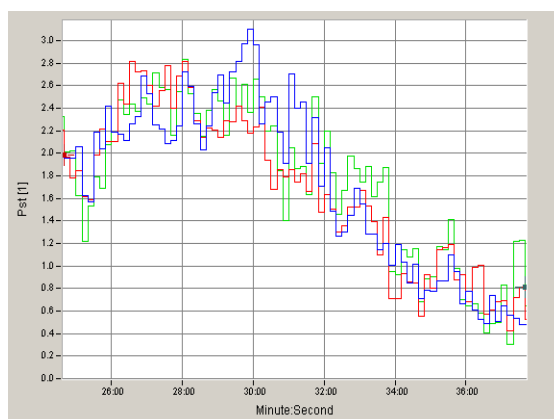
Simuloinnit ilman päämuuntajaa

Aineistoilla simuloitiin myös tilannetta, jossa päämuuntajan reaktanssi pudotettiin 1 %:iin. Reaktanssin pienentämisellä haluttiin eliminoida valokaariuunin pätötehon vaihtelun vaikutus flikkeriarvoihin, sillä pätövirta aiheuttaa loistehohäviöitä päämuuntajassa ja näin pätötehon vaihtelu näkyy myös loistehon vaihteluna PCC:ssä. Avoimella säädöllä tätä loistehoa ei voida kompensoida, sillä avoimessa säädössä SVC:tä ohjataan kuormavirtaan perustuen. Päämuuntajassa tapahtuvien loistehovaihteluiden kompensointiin avoimessa säädössä tulisi käyttää myös PCC:n virtaa tai ottaa kuorman pätöteho huomioon jollain tavalla. Aihe rajattiin kuitenkin tämän diplomityön ulkopuolelle, joten asiaan ei mietitty tarkempaa ratkaisua.

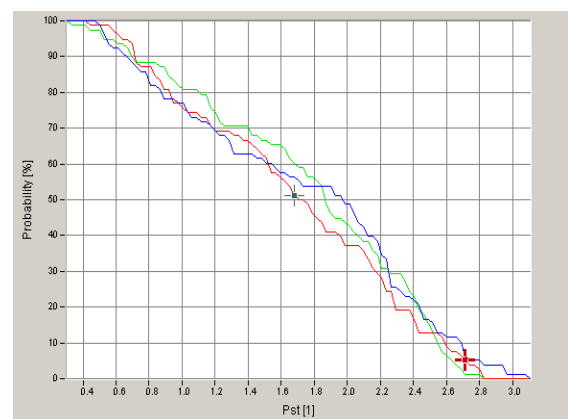
Ilman päämuuntajaa suoritettujen simulointien tulokset on esitetty seuraavina. Valokaariuunin flikkeriprofiilit toisen yliaaltosuodattimen, perinteisen säädön omaavan SVC:n ja vektorisäätöön perustuvan SVC:n kanssa ovat esitetty kuvassa 6.16. Jokaisen kompensointivaihtoehdon flikkeriprofiilit ja todennäköisyysjakaumat on esitetty tarkemmin kuvissa 6.17-6.19.



Kuva 6.16. Valokaariuunin flikkeriprofiilit 10 sekunnin keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa: uunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, perinteisellä säädöllä ohjattu SVC sekä vektorisäädöllä ohjattu SVC. Uunia syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja pää muuntajan reaktanssi on 1 %.

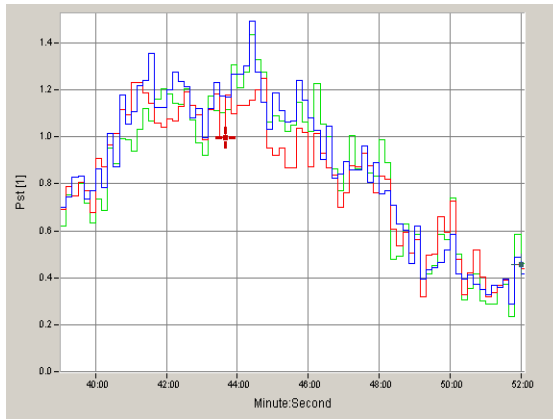


(a)

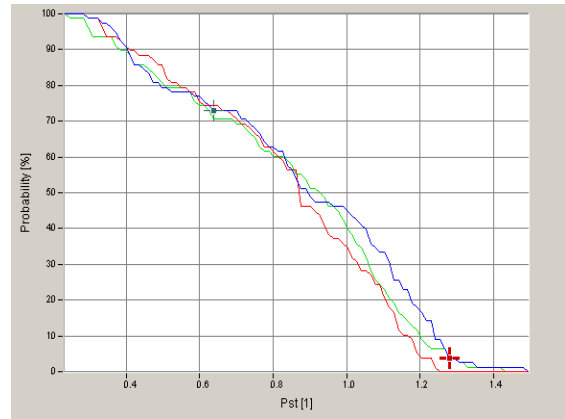


(b)

Kuva 6.17. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 2,72$.

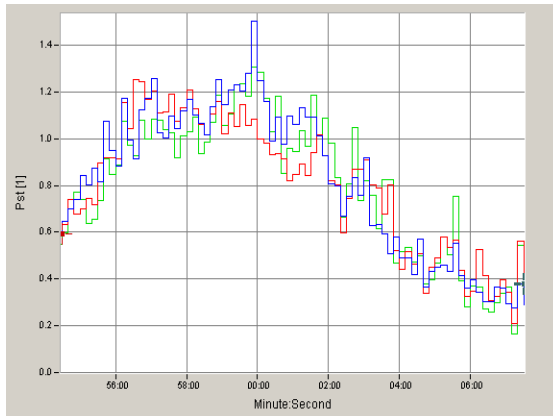


(a)

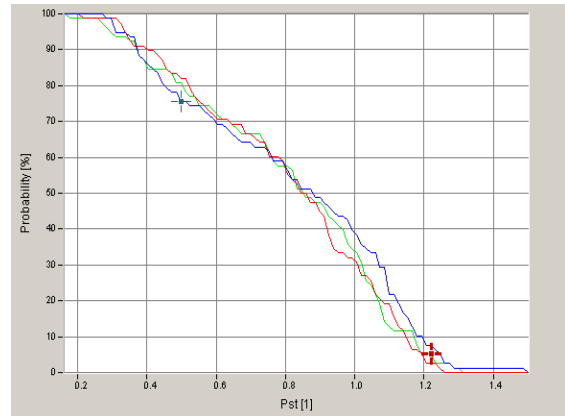


(b)

Kuva 6.18. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä, syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 1,27$.



(a)



(b)

Kuva 6.19. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä, syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 1,23$.

Profiilien perusteella vektoripohjainen säätö on vieläkin parempi kuin tällä hetkellä käytössä oleva vaihekääntöön perustuva säätö, mutta suorituskkyjen välinen ero on pienempi kuin edellisissä simuloinneissa päämuuntajan kanssa.

6.3.2. Tavanomainen valokaariuuni

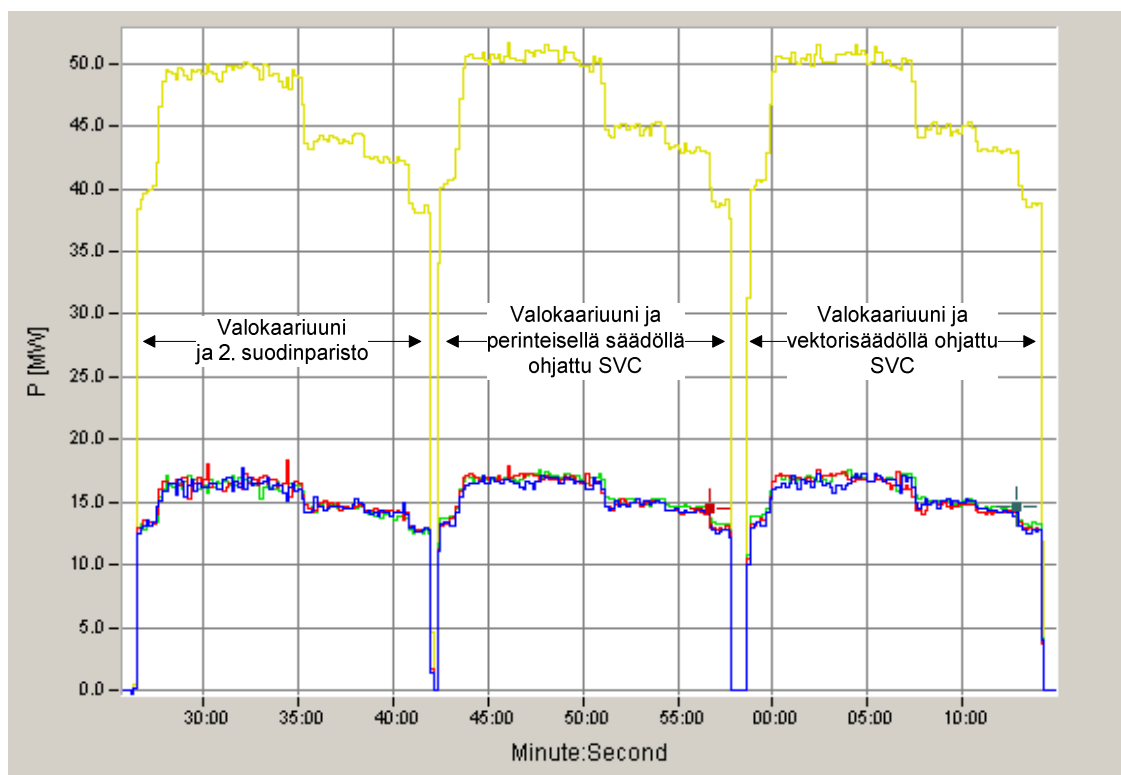
Tavanomaisen valokaariuunin simuloinneissa käytettiin Outokumpu Oy:n Avestan terästehtailta mitattua aineistoa. Aineisto on mitattu huhtikuussa, joten se vastaa hyvin tehtaan tämän hetkistä ajotilannetta. Uunin käyttäytyminen on selvästi rauhallisempaa, eivätkä tehon muutokset ole niin rajuja kuin Severskyn valokaariuunin. Uunin rauhallisempi käytös tuli esille myös parhaan kompensointiasteen määrittämisessä, sillä par-

haalla kompensointiasteella Avestan uunin loistehon keskiarvo on selvästi Severskyn uunin keskiarvoa suurempi. Kuitenkin uunin kompensoimattoman flikkerin profilissa on enemmän vaihteluita, eikä valokaariuunille tunnusomainen käyrämuoto ole niin selvä.

Myös tällä aineistolla ajettiin kolme simulointia. Ensin simuloitiin tilanne, jossa uunia syöttävä verkko on vahva. Toiseksi sama simulaatio suoritettiin heikommalla verkolla. Molemmissa tapauksissa päämuuntajan reaktanssi oli 12 %. Kolmanneksi simuloitiin tilanne, jossa päämuuntajan reaktanssi pudotettiin 1 %:iin.

Simuloinnit vahvalla verkolla

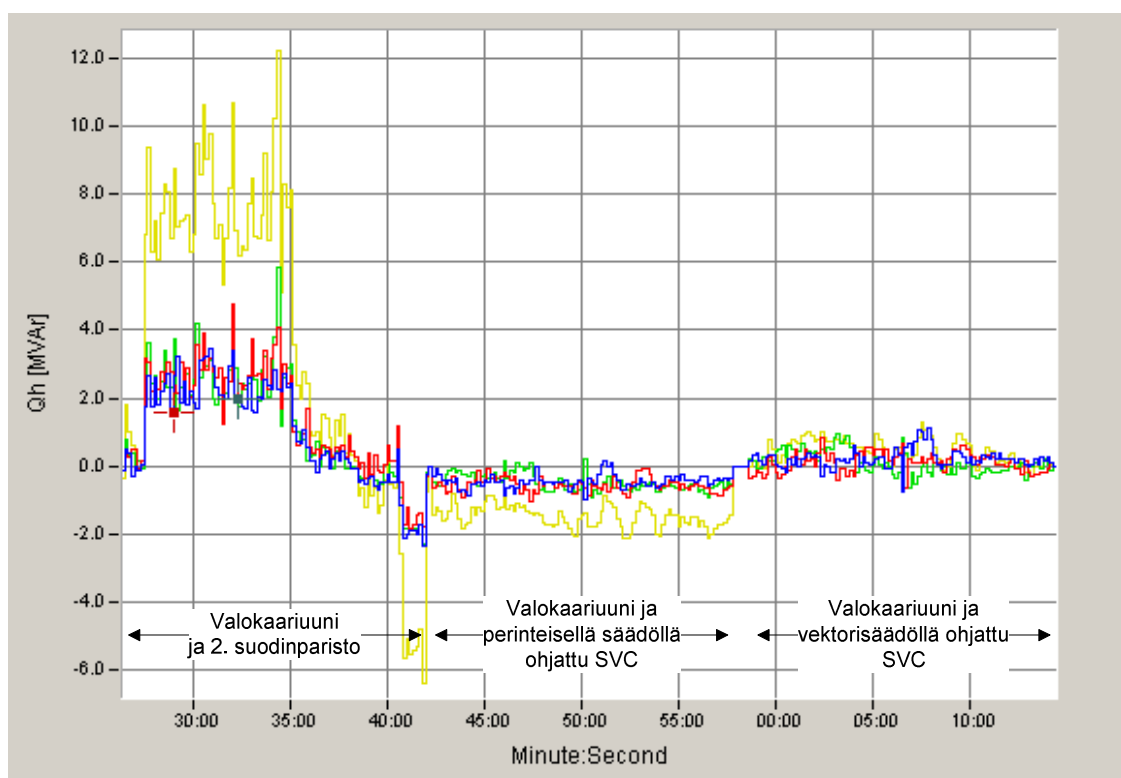
Myös Avestan valokaariuunin simulointeihin määritettiin sopiva kompensointiaste vertailevilla simuloinneilla. Vertailussa simulointeja suoritettiin useilla eri uunivirran virtavahvistuksilla, ja näistä tapauksista valittiin se, jolla flikkerivaimennus oli suurimmillaan. Kompensointitulos oli paras, kun pätötehon suuruus oli sulatuksen aikana noin 50 MVA. Kuvassa 6.20 on esitetty kyseisellä virtavahvistuksella simuloitunut PCC:n pätötehokuvaajat, kun uunin rinnalla on toisen yliaallon suodatin, vaihekääntöön perustuva SVC sekä vektorisäätöön perustuva SVC.



Kuva 6.20. Avestan valokaariuunin pätötehoprofilit 10 s keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa. Ensimmäisessä valokaariuunin rinnalle on kytketty toinen yliaaltosuodatin, toisessa tapauksessa uunin rinnalle on kytketty nykyistä säätötapaa käyttävä SVC ja kolmannessa tapauksessa vektorisäätöön perustuva SVC.

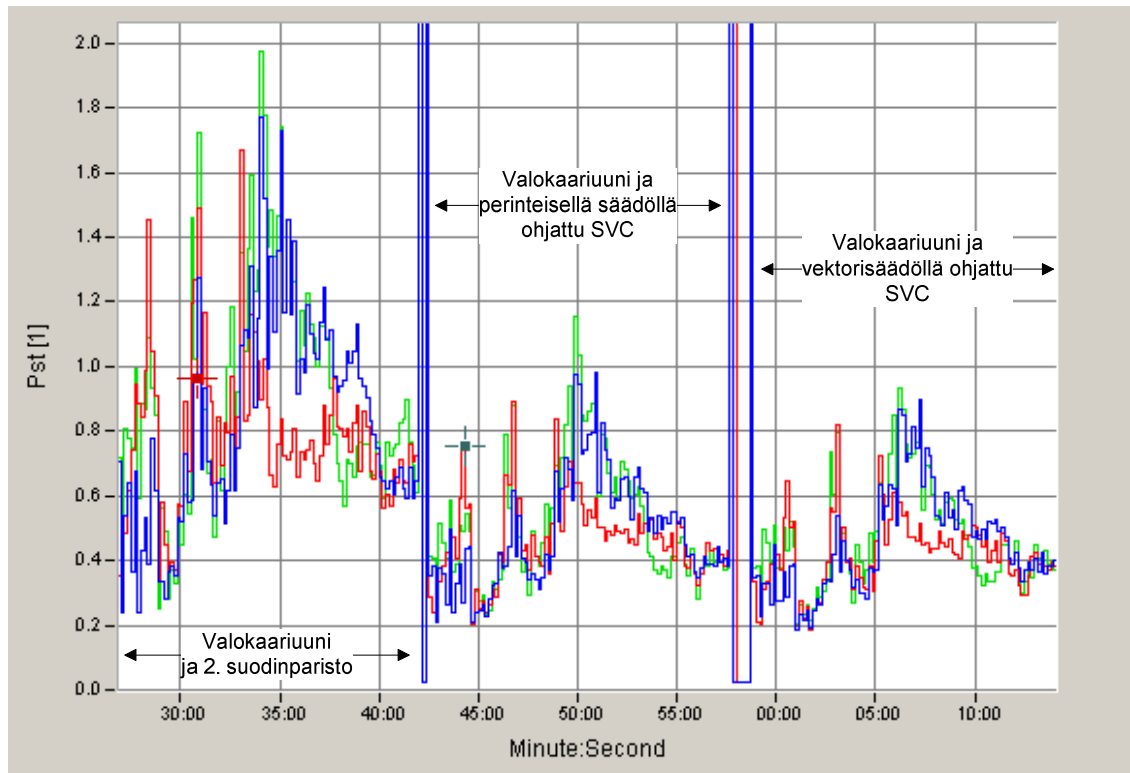
Pätötehoprofiileista nähdään, että ne ovat erilaiset verrattuna Severskyn valokaariuunin vastaaviin kuvaajiin. Avestan uunissa pätöteho on ensin suurempi ja laskee loppua kohti, kun Severskylä tilanne on päinvastainen. Toinen huomionarvoinen eroavaisuus on pätötehon vaihtelu. Avestan uunin pätötehon vaihtelu on selvästi maltillisempaa kuin Severskyn uunin.

Kuvassa 6.21 on esitetty vastaavien tilanteiden loistehojen kuvaajat samalla 10 sekunnin keskiarvostuksella. Kompensoimattoman loistehon voidaan todeta vaihtelevan voimakkaasti sulatuksen alkuvaiheessa, mutta loppua kohti loistehon vaihtelu tasaantuu. Myös loistehon määrä tippuu loppua kohden voimakkaasti. Kuvan loistehon tasoa tutkittaessa on muistettava, että kokonaisloistehoa on jo kompensoitu toisen yliaallon suodattimella 33,5 MVar. Tällöin suurin loistehoarvon 10 s keskiarvo on noin 45 MVar.

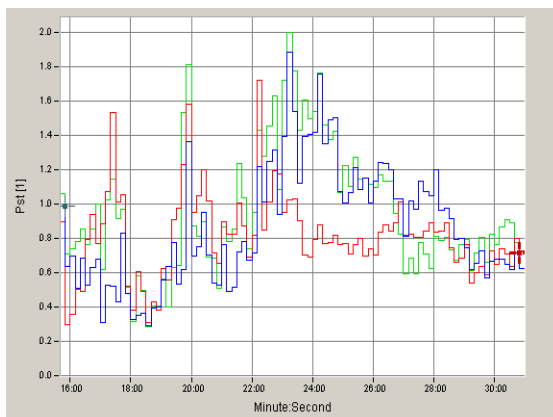


Kuva 6.21. PCC:stä mitatut valokaariuunin loistehoprofiilit 10 s keskiarvostuksella, kun uunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, nykyisellä säätösovelluksella toteutettu SVC ja vektorisäätöön perustuva SVC.

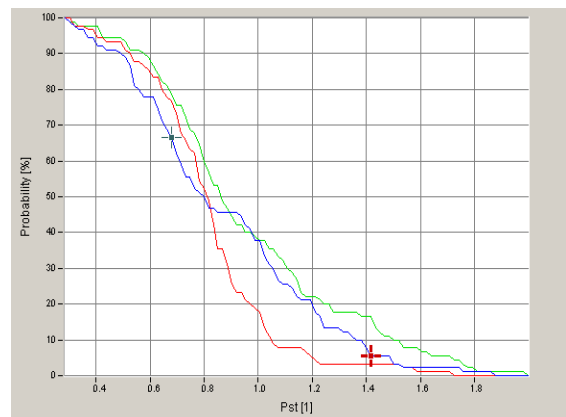
Kuvassa 6.22 on esitetty flikkerikuvaajat edellä mainituista tilanteista. Flikkerikuvaajien muoto poikkeaa Severskyn vastaavista kuvista terävien piikkien osalta. Kuvaajan perusteella vektorisäätöinen SVC omaa tässäkin tapauksessa paremman suorituskyvyn kuin vaihekääntöön perustuva SVC. Tarkemmin flikkerin kuvaajia on esitetty kuvissa 6.23-6.25.



Kuva 6.22. PCC:stä mitatut valokaariuunin flikkeriprofiilit 10 sekunnin keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa: ilman aktiivista kompensointia, uunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja uunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä. Uunia syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 12 %.

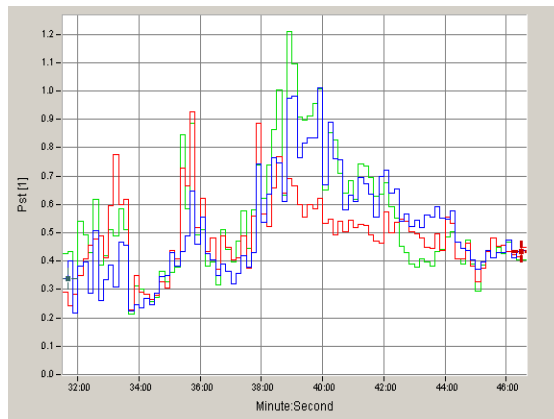


(a)

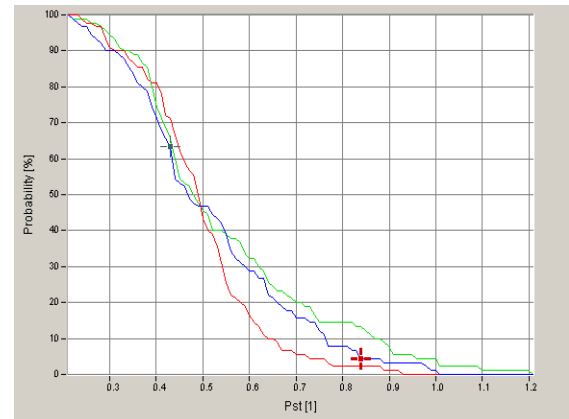


(b)

Kuva 6.23. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 1,53$.

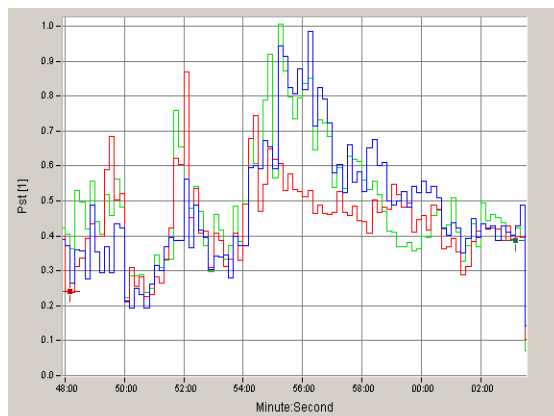


(a)

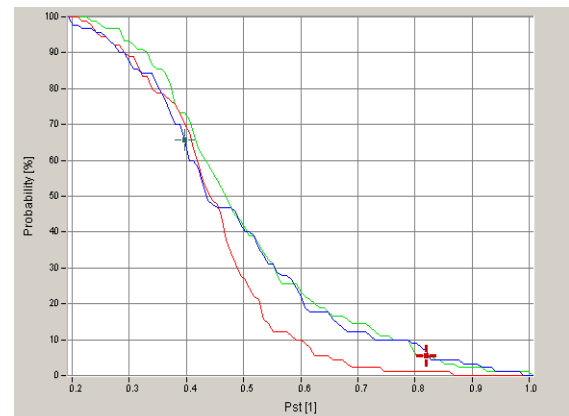


(b)

Kuva 6.24. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 0,89$.



(a)

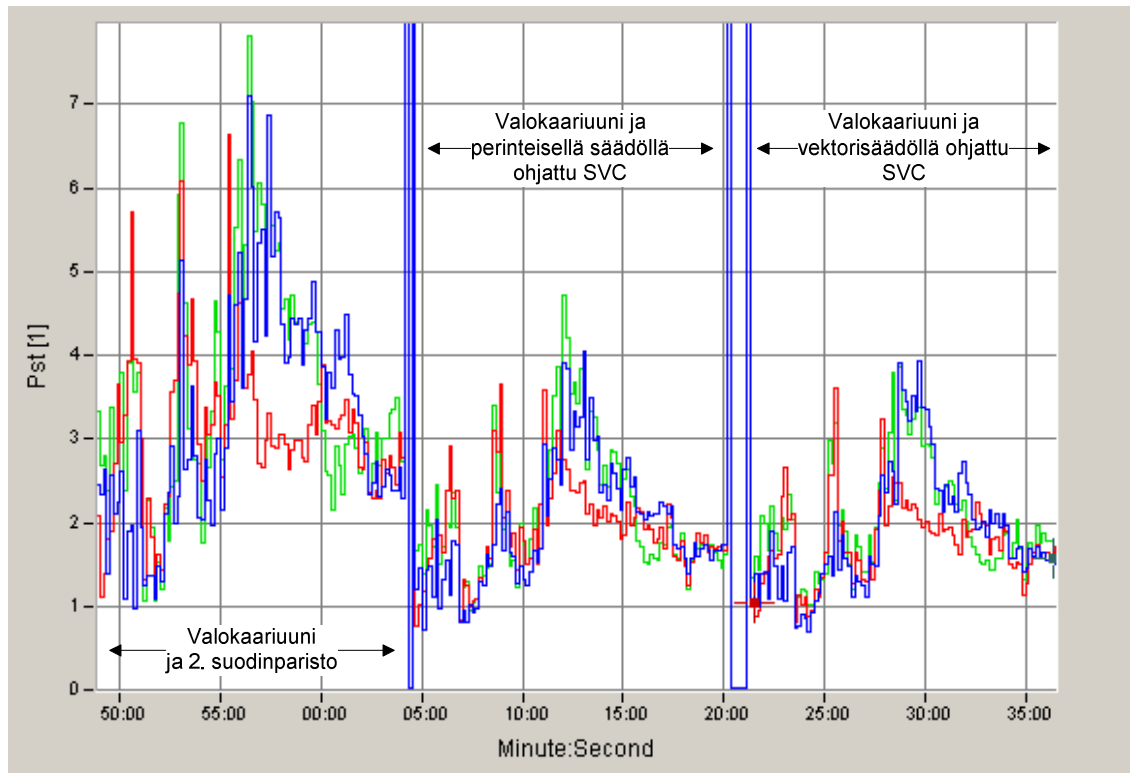


(b)

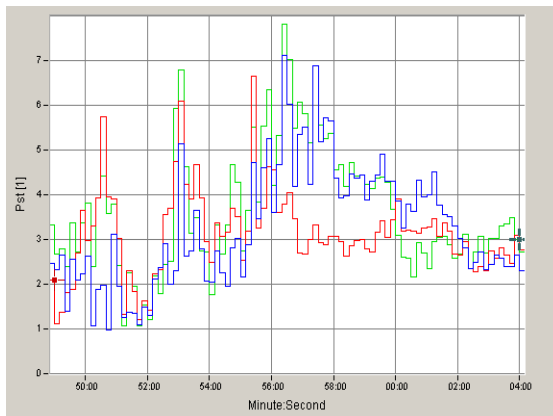
Kuva 6.25. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 0,81$.

Simuloinnit heikolla verkolla

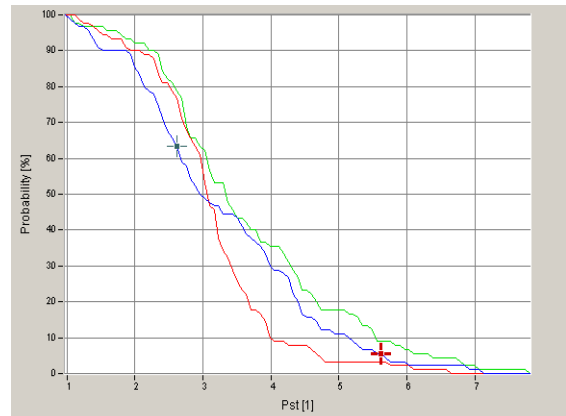
Heikon verkon simuloinneissa verkon oikosulkutehon arvona käytettiin samaa kuin Severskyn aineistolla, eli 1000 MVA. Päämuuntajan oikosulkureaktanssi oli niin ikään 12 % ja muuntajan nimellisteho 120 MVA. Kuvassa 6.26 on esitetty flikkerikuvaajat heikon verkon tilanteessa. Kuvissa 6.27-6.29 flikkerikuvaajia on esitetty tarkemmin.



Kuva 6.26. PCC:stä mitatut valokaariuunin flikkeriprofiilit 10 sekunnin keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa: ilman aktiivista kompensointia, uunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja uunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä. Uunia syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 12 %.

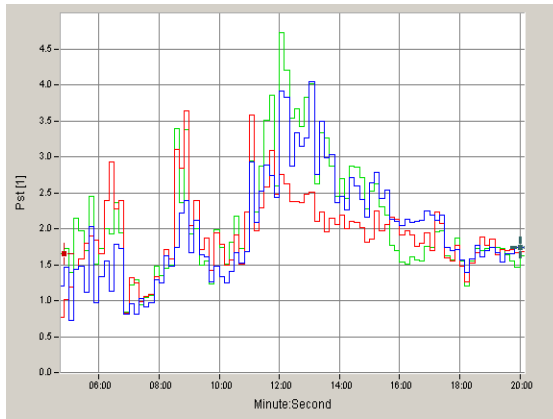


(a)

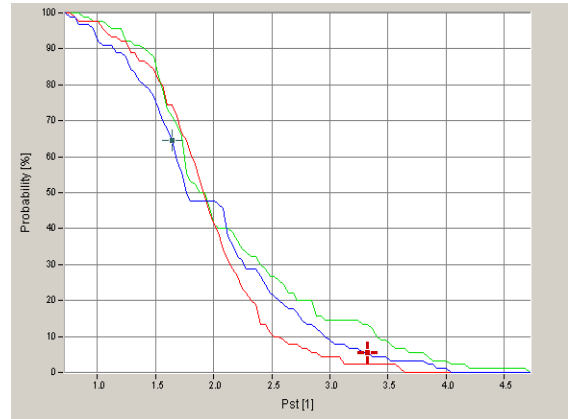


(b)

Kuva 6.27. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 5,73$.

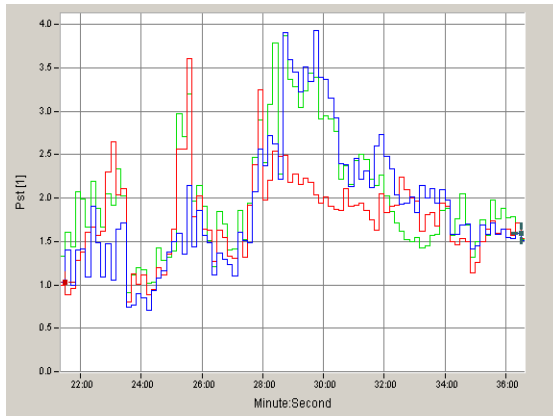


(a)

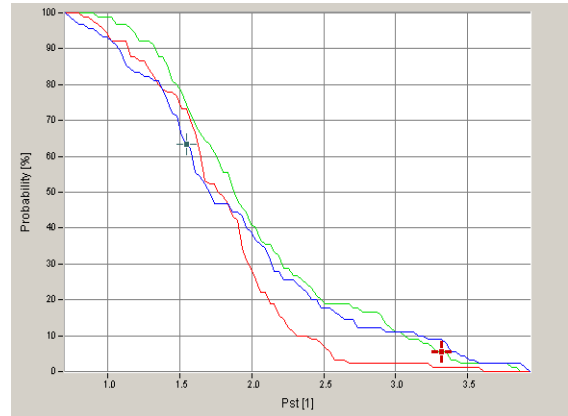


(b)

Kuva 6.28. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 3,49$.



(a)

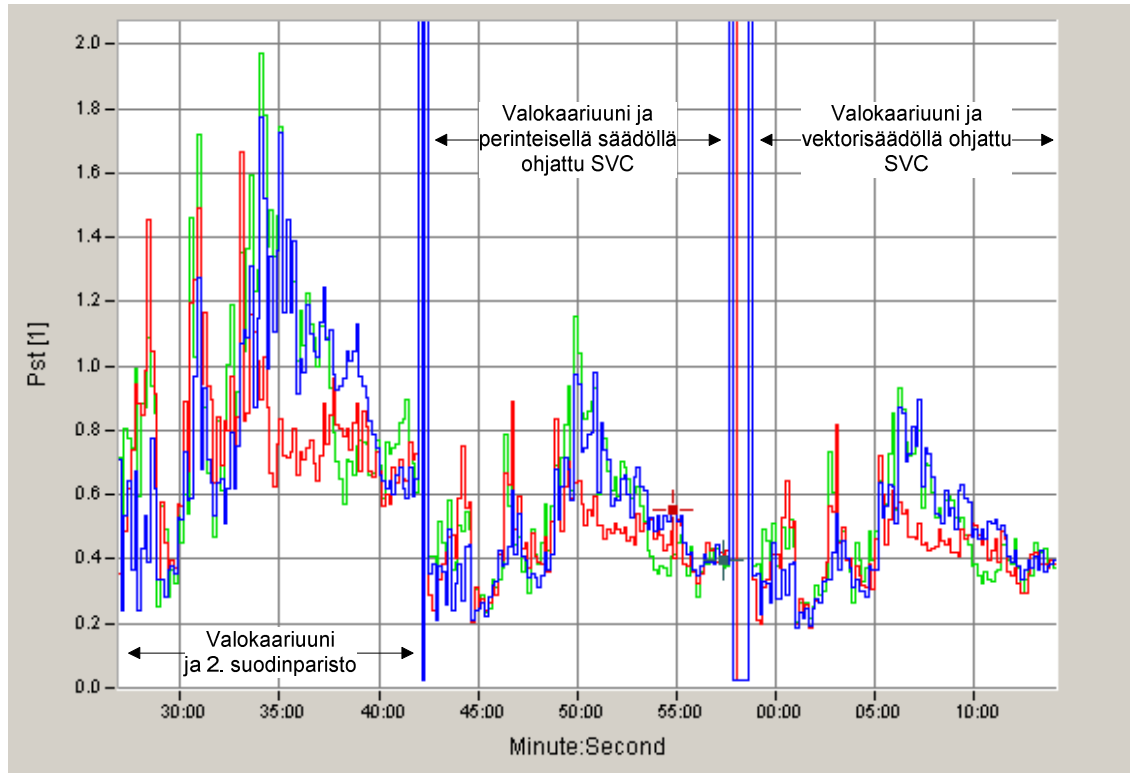


(b)

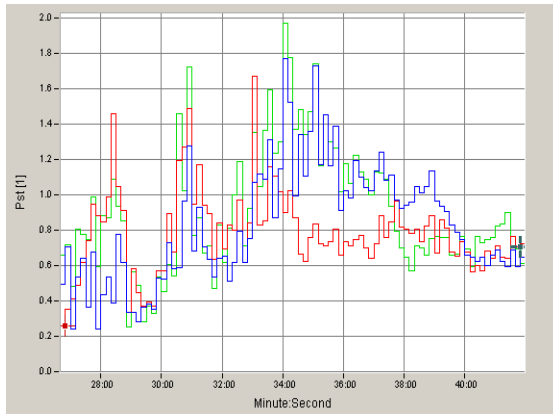
Kuva 6.29. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä ja syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 3,34$.

Simuloinnit ilman päämuuntajaa

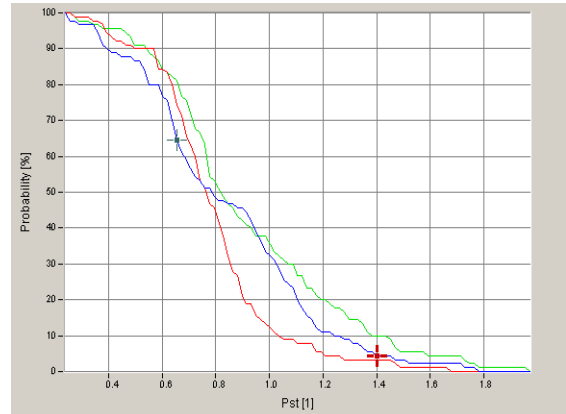
Ilman päämuuntajaa suoritettaviin simulointeihin päämuuntajan reaktanssi pudotettiin 1 %:iin. Tällöin pätötehon vaihtelun aiheuttama flikkeri on mitätön verrattuna loistehon aiheuttamaan flikkeriin. Flikkerikuvaajat ilman kompensointia, vaihekääntöön perustuvan SVC:n kanssa sekä vektorisäätöisen SVC:n kanssa on esitetty kuvassa 6.30. Flikkerikuvaajat on kuvattu yksitellen kuvissa 6.31-6.33.



Kuva 6.30. PCC:stä mitatut valokaariuunin flikkeriprofiilit 10 sekunnin keskiarvostuksella kolmessa eri tilanteessa: ilman aktiivista kompensointia, uunia kompensoidaan perinteiseen säätöön perustuvalla SVC:llä ja uunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:n kanssa. Uunia syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %.

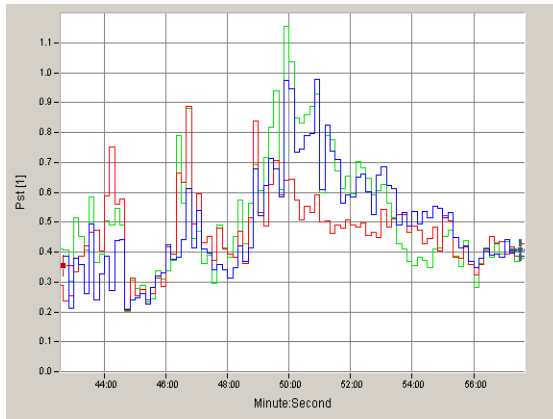


(a)

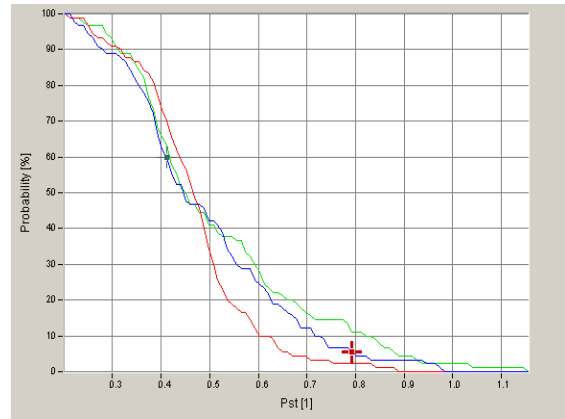


(b)

Kuva 6.31. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunin rinnalle on kytketty toisen yliaallon suodatin, syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 1,46$.

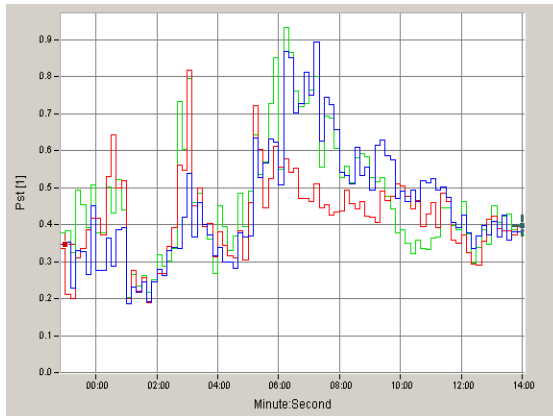


(a)

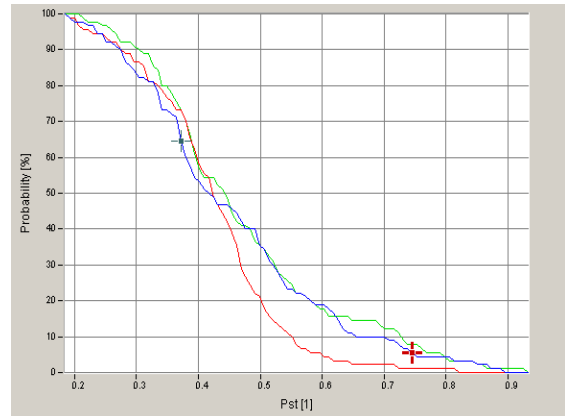


(b)

Kuva 6.32. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan perinteisellä säädöllä ohjatulla SVC:llä, syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 0,83$.



(a)



(b)

Kuva 6.33. PCC:stä mitattu flikkeri, kun valokaariuunia kompensoidaan vektorisäädöllä ohjatulla SVC:llä, syöttävän verkon oikosulkuteho on 3700 MVA ja päämuuntajan reaktanssi on 1 %. (a) Flikkerin vaihekohtainen profiili ja (b) todennäköisyysjakauma. Flikkerin $P_{st}(95) = 0,75$.

Näissä simuloinneissa saadut flikkeriarvot ovat selvästi pienempiä kuin Severskyn simuloinneissa saadut arvot ilman päämuuntajaa. Flikkeriarvoja tarkastellessa huomataan, että myös flikkerin vaimennus on alempi verrattuna Severskyn simulointeihin. Osittain syynä tähän voi olla lähtökohtaisesti alempi flikkeritaso, jolloin SVC:llä ei päästä samaan flikkerin vaimennukseen. Toiseksi SVC ei kummallakaan säätötavalla onnistu vaimentamaan profiileissa esiintyviä korkeita piikkejä, joka viittaisi siihen, että SVC:n vasteaika on liian hidas kyseisille kuorman muutoksille.

7. TULOSTEN TARKASTELU

Simulointien tulokset on koottu taulukoihin 7.1 ja 7.2. Hankalan valokaariuunin tulokset, jotka ovat simuloitu Severskyn aineistolla, ovat esitetty taulukossa 7.1. Avestan aineistolla simuloidut rauhallisemman valokaariuunin simulointien tulokset ovat esitetty taulukossa 7.2. Taulukoissa on eritelty saadut flikkerilukemat ja vaimennuskertoimet tapauskohtaisesti. Flikkerin vaimennuskertoimien yhteydessä on myös esitetty prosentuaalinen ero säätöjärjestelmien flikkerivaimennuksissa. Eroa laskettaessa vektorisäätöä on verrattu vaihekääntöön.

Taulukko 7.1. Flikkeriarvot ja flikkerin vaimennuskertoimet Severskyn aineistoilla tehdyissä simuloinneissa.

SEVERSKY	valokaariuuni	vaihekääntöpiiri	vektorisäätö	ero
Sk = 3700 MVA, x = 12 %	2,81	1,37	1,31	
flikkerivaimennus		2,05	2,15	+4,9 %
Sk = 1000 MVA, x = 12 %	10,58	5,35	5,05	
flikkerivaimennus		1,98	2,10	+6,1 %
Sk = 3700 MVA, x = 1 %	2,72	1,27	1,23	
flikkerivaimennus		2,14	2,21	+3,3 %

Taulukko 7.2. Flikkeriarvot ja flikkerin vaimennuskertoimet Avestan aineistoilla tehdyissä simuloinneissa.

AVESTA	valokaariuuni	vaihekääntöpiiri	vektorisäätö	ero
Sk = 3700 MVA, x = 12 %	1,53	0,89	0,81	
flikkerivaimennus		1,72	1,89	+9,9 %
Sk = 1000 MVA, x = 12 %	5,73	3,49	3,34	
flikkerivaimennus		1,64	1,72	+4,9 %
Sk = 3700 MVA, x = 1 %	1,46	0,83	0,75	
flikkerivaimennus		1,76	1,95	+10,8 %

Kaikissa simulointitapauksissa vektorisäädöllä saavutetaan parempi lopputulos kuin vaihekääntöön perustuvalla säädöllä. Vektorisäädöllä saadut flikkerin vaimennuskertoimet ovat pienimmilläänkin kolme prosenttia vaihekääntöön perustuvalla säädöllä saatuja arvoja parempia. Suurin flikkerivaimennus saavutettiin molemmilla säätöjärjestelmillä odotetusti hankalalla valokaariuunilla ilman päämuuntajaa. Vektorisäädöllä päästiin tällöin vaimennuskertoimen arvoon 2,21 ja vaihekääntöön perustuvalla säädöllä 2,14 vaimennuskertoimeen. Rauhallisemmalla valokaariuunilla flikkerivaimennus oli suurimmillaan vektorisäädöllä 1,95 ja vaihekääntöön perustuvalla säädöllä 1,76. Vekto-

risäädöllä saavutetut flikkerin vaimennuskertoimet vastaavat hyvin kirjallisuudessa esitettyjä SVC:n vaimennuskertoimien arvoja. Lähteessä [30] on SVC:n flikkerin vaimennuskertoimeksi määritetty 2,0.

Verrattaessa eri tapausten flikkerin vaimennuskertoimia uunikohtaisesti nähdään, että ilman päämuuntajaa saavutetaan paras lopputulos molemmilla säätötavoilla. Tällöin pätötehon vaihtelusta aiheutuva päämuuntajan loistehon vaihtelu ei näy tuloksissa. Tämän perusteella voisi arvioida, että pätötehon vaihtelun huomioon ottaminen säätösovelluksessa toisi muutaman prosentin parannuksen flikkerivaimennukseen, kun verkossa on kytkettynä normaali päämuuntaja. Flikkerivaimennuksen huononeminen voi kylläkin johtua myös keskijännitekiskon lisääntyneestä säröstä. Päämuuntajan kasvaneen reaktanssin myötä keskijännitekiskostossa särökomponenttien osuus kasvaa, joka häiritsee SVC:n säätöä.

Flikkerin vaimennuskerroin putoaa myös, kun verkon oikosulkuteho pudotetaan 3700 MVA:sta 1000 MVA:iin. Tällöin flikkerilukemat ovat korkeampia kuin vahvalla verkolla. Flikkerilukemien nouseminen johtuu syöttävän verkon kasvaneesta impedansista, jolloin virran aiheuttama jännitehäviö on suurempi. Kuormavirran vaihdellessa myös jännitehäviö vaihtelee enemmän ja aiheuttaa näin korkeamman flikkeritason kuorman liityntäpisteeseen. Flikkerin vaimennuskertoimien huononeminen johtune samasta syystä kuin päämuuntajan lisäämisen yhteydessä. Korkeampi impedanssi aiheuttaa sen, että keskijännitekiskoston särön määrä kasvaa, joka näin haittaa SVC:n säätöä.

Tarkasteltaessa kummallakin simulointiaineistolla säätöjärjestelmien välisiä prosentuaalisia eroja ovat muutokset simulointiaineistojen välillä päinvastaisia. Severskyn aineistolla säätöjärjestelmien välinen ero on suurimmillaan heikolla verkolla, kun taas Avestan aineistolla säätöjärjestelmien välinen ero on suurimmillaan vahvalla verkolla ilman päämuuntajaa. Oletettavasti ero johtuu säätöjärjestelmien yhteydessä käytettyjen mittaussignaalien suodatuksien eroavaisuudesta ja vektorisäädön häiriöalttiudesta. Severskyn aineiston simuloinneissa vaiheenkääntöön perustuvassa säädössä ei käytetty mittaussignaalien suodatusta lainkaan, jolloin tulokset huononevat sitä enemmän mitä enemmän yliaaltoja ja säröä mittaussuureissa esiintyy. Tästä syystä kompensointitulokset huononevat suhteessa vektorisäätöön. Avestan simuloinneissa säätöjärjestelmien välinen ero kapenee päämuuntajan ja verkon reaktanssien kasvaessa. Tähän syynä on luultavimmin vektorisäädön häiriöherkkyys. Avestan simuloinneissa myös vaiheenkääntöön perustuvassa säädössä käytetään mittaussignaaleiden suodatusta ja tämän vuoksi se sietää paremmin kasvanutta säröä ja yliaaltopitoisuutta. Avestan tapauksessa vektorisäätö häiriintyy enemmän kasvaneesta säröstä.

Simulointien toistuvuutta tutkittiin suorittamalla Avestan aineiston simuloinnit toisen kerran. Tulosten tarkastelussa todettiin, että erot kahden simuloinnin flikkerin vaimennuskertoimien välillä olivat suurimmillaan noin kolmen–neljän prosentin luokkaa. Virhe on selitettävissä simuloitavan aineiston lyhyellä kestolla, jolloin flikkeriarvojen jakaantuminen 10 s mittausjaksojen välille tuo vaihteluita lukemiin. Karrikoidusti esimerkiksi korkean 9 s kestävä flikkeripiikin jakautuminen kahdelle 10 s mittausjaksolle puolittaa flikkerin huippuarvon verrattuna siihen, että piikki osuisi vain yhdelle 10 s

mittausjaksolle. Kestoltaan lyhyessä mittausaineistossa, jossa korkeita flikkerilukemia ei ole paljoa, tällaiset tasoittumiset vaikuttavat tuloksiin enemmän kuin flikkerilukemiltaan tasaisemmalla aineistolla. Avestan aineisto on edellä mainitun kaltaista sisältäen muutamia korkeita flikkeripiikkejä, mikä näkyy myös eri simulointien tuloksissa.

Samaa asiaa tutkittiin myös vertailemalla Severskyn aineiston simulointeja samoja tilanteita vastaaviin aiemmin suoritettuihin simulointeihin. Näissä vertailussa todettiin, että tulokset eivät vaihdelleet eri simulointien kesken juurikaan. Tämä tukee edellä esitettyä selitystä Avestan aineistolla saatujen tulosten vaihteluun, sillä Severskyn aineisto ei sisällä Avestan aineiston tavoin yksittäisiä korkeita flikkeripiikkejä, vaan lukemat ovat jakautuneet tasaisemmin. Tästä syystä myös tulosten välinen vaihtelu on pienempää.

8. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää SVC:lle vektoripohjainen säätöjärjestelmä valokaariuunin loistehon kompensointiin ja vertailla säätöjärjestelmän suorituskykyä perinteisen, vaihekääntöön perustuvan säätöjärjestelmän suorituskykyyn. Vaihekääntöön perustuvalla säätötavalla saavutetaan hyvä kompensointitulok, mutta Alstom Grid Oy halusi selvittää myös vektoripohjaisen säätöjärjestelmän suorituskyvyn. Suorituskykyä mitattiin työssä flikkerin vaimennuskykynä, joka on myös yleensä teollisuudessa käytettävän SVC:n tärkein ominaisuus. Flikkerin vaimennuskyky määriteltiin vaimennuskertoimena, joka kertoo kuinka paljon SVC saa vaimennettua valokaariuunin aiheuttamaa flikkeriä alkuperäiseen tilanteeseen nähden.

Työn tavoitteiden puitteissa vektoripohjaisen säätöjärjestelmän kehittäminen rajattiin ainoastaan avoimen säädön toteuttamiseen. Suljettua säätöä ei toteutettu, sillä suljettu säätö ei vaikuta flikkerin vaimennuskykyyn, joka oli työn kannalta tärkein tarkasteltava suure. Avoimen säädön toteutuksessa kehitettiin ainoastaan laskenta, jolla TCR:lle saadaan laskettua vaihevälikohtaiset susceptanssiohjeet kuorman mittaussignaalien perusteella.

Säätöjärjestelmän kehittäminen alkoi susceptanssilaskentaan sopivan algoritmin selvittämällä. Algoritmin osalta päädyttiin laskentaan, jossa susceptanssiohjeet määritetään kuormavirran symmetrisistä komponenteista. Susceptanssiohjeiden laskennassa tarvittiin myös komponenttien reaali- ja imaginääriosat eroteltuina toisistaan, joten komponentit tuotiin laskentaan synkronisen koordinaatiston vektoreina, jolloin symmetriset komponentit oli helppo jakaa kohtisuoriin komponentteihin. Vektoritasossa tapahtuvaan symmetristen komponenttien erotteluun löytyi useitakin vaihtoehtoja. Eri vaihtoehtoja vertailtiin RSCAD-simuloinneissa, joiden perusteella komponenttien erottelu päätettiin toteuttaa stationäärisessä vektorikoordinaatistossa. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että mitatut kuormavirrat muutettiin ensin stationääriseen vektorikoordinaatistoon, jossa niistä eroteltiin symmetriset komponentit. Tämän jälkeen erotellut komponentit muunnettiin synkronisiin vektorikoordinaatistoihin, joista komponentit vietiin susceptanssiohjeiden laskentaan d- ja q-komponentteina.

Kun säädön toteutusperiaate oli valittu, säätö rakennettiin NDC-järjestelmään ja sen toiminnallisuutta testattiin reaaliaikasinuloinneilla, joissa käytettiin RTDS-simulointiympäristöä. Simulointiympäristössä mallinnettiin valokaariuunin toimintaympäristö, johon SVC liitettiin. Simulointimalliin syötettiin todellisen valokaariuunin sulatuksen aikaista mittausaineistoa, jotta saatiin selville säätömallin suorituskyky todellisessa ympäristössään. Simuloinneissa mittausaineistona käytettiin kahden valokaariuunin aineistoja, jolloin säätömallin toimivuutta voitiin tarkastella erilaisilla valokaariuun-

neilla. Simuloinnissa käytetyt parametrit pyrittiin valitsemaan todellisuutta hyvin vastaaviksi.

Tulosten perusteella SVC:n vektoripohjainen säätö pystyy parempaan suorituskyykyyn kuin perinteinen vaihekääntöön perustuva säätötapa. Ero säätötapojen välillä on pienimmillään vain muutaman prosentin luokkaa, mutta jokaisessa simuloidussa tapauksessa vektorisäätö antoi paremman lopputuloksen. Normaalilla valokaariuunilla ilman päämuuntajaa suoritettussa simuloinnissa vektorisäädöllä flikkerivaimennus oli jopa kymmenen prosenttia perinteisen säätötavan flikkerivaimennusta parempi. Tämä oli myös suurin säätöjärjestelmien välinen ero. Hankalalla valokaariuunilla säätöjärjestelmien välinen ero ei ollut niin suuri, mutta sielläkin vektorisäätö antoi pienimmillään kolme prosenttia ja suurimmillaan kuusi prosenttia perinteistä säätöä paremman lopputuloksen. Hankalalla valokaariuunilla saavutettiin myös vektorisäädön suurin flikkerin vaimennuskerroin, joka vastaa hyvin myös kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.

Tulosten mukaan normaalin valokaariuunin tapauksessa vektorisäädöllä saataisiin suurin etu verrattuna perinteiseen säätöön. Hankalalla valokaariuunilla ero on pienempi. Tätä ei kuitenkaan voi näiden simulointien perusteella vielä yleistää ennen laajempia simulointeja. Simulointien perusteella voidaan kuitenkin todeta, että vektoripohjainen laskenta on herkempi kuormavirran särölle, kuin perinteinen säätötapa. Tätä johtopäätöstä tukee simulointeja varten suoritettut testit mittaussignaalien suodatukselle, joissa vektorisäädölle tuli asettaa alemman rajataajuuden omaavat alipäästösuotimet parhaan suorituskyykyyn saavuttamiseksi.

Vektorilaskentaan pohjautuvaa säätöä voidaan pitää käyttökelpoisena tapana toteuttaa SVC:n avoin säätö valokaariuunin loistehon kompensointiin. Säätötapa vaatii kuitenkin vielä lisäsimulointeja, jotta voitaisiin varmistaa säätöjärjestelmän käyttäytyminen eri olosuhteissa. Suorituskyykyä voisi olla mahdollista parantaa optimoimalla säätöjärjestelmän mittaussignaalien suodatusta ja PLL-toteutusta. Näillä saatava suorituskyykyyn parannus jäänee kuitenkin muutamiin prosentteihin.

LÄHTEET

- [1] Mathur, M.R., Varma, R.K. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. New York, USA. 2002. IEEE Press and John Wiley & Sons. 495 p.
- [2] Oinonen, V. Industrial SVC. Tampere 2010. Alstom Grid. Power Point Show. 42 p.
- [3] Kangasala SVC, 2008. Projektikuvahakemisto. Alstom Grid Oy.
- [4] Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E. Power Electronic Control in Electrical Systems. 2002. Newness Press. 443 p.
- [5] Mikkola, J-P. Staattisen loistehon kompensattorin mallintaminen PSS/E ohjelmistolla. Diplomityö. Tampere 2010. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto. 94 s.
- [6] Hingorani, N.G., Gyugyi, L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York, USA. 2000. IEEE Press. 432 p.
- [7] Sastry Vedom, R., Sarma, M. Power Quality: VAR Compensation in Power Systems. 2009. CRC Press. 268 p.
- [8] BRP Steel SVC Instruction Manual. Tampere 2011. Alstom Grid Oy.
- [9] EN-TH01-11/2002. Power Factor Correction, ohjetiedosto. Tampere 2002, Nokian Capacitors Oy. 12 p.
- [10] Kara, O. Välkyntämittareiden kalibrointimenetelmän kehittäminen. Diplomityö. Espoo 2007. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. 74 s.
- [11] Nousiainen, K. Sähkövoimajärjestelmän perusteet, Tampere, 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähköenergiatekniikan laitos. Luentomoniste. 170 s.
- [12] Baghini, A. Handbook of Power Quality. 2008. John Wiley & Sons, Ltd. 618 p.
- [13] Arrillaga, J. & Watson, N.R. Power System Harmonics. Second edition. 2003, John Wiley & Sons. 418 p.
- [14] Kähkönen, A. Kangasala SVC Insulation Co-ordination Study. Tampere 2008, Alstom Grid Oy. 9 p.
- [15] Health Physics 74 (4): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). 1998, INCIRP. pp. 494-522.
- [16] Halonen, P. Kangasala SVC Magnetic Field Study. Tampere 2008, Alstom Grid Oy. 9 p.

- [17] Lavapuro, J. Tyristoriohjatun sarjakompensointipariston ohjausjärjestelmä. Diplomityö. Tampere 2008. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto. 66 s.
- [18] Wang, J., Fu, C., Zhang, Y. SVC Control System Based on Instantaneous Reactive Power Theory and Fuzzy PID. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 4. April 2008, IEEE. pp. 1658-1665.
- [19] Lee, S.-Y., Wu, C.-J. Reactive Power Compensation and Load Balancing for Unbalanced Three-Phase Four-Wire System by a Combined System of an SVC and a Series Active Filter. IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 147, Issue 6. November 2000, Institution Electrical Engineers. pp. 563-571.
- [20] Ji, F., Khan, M. M., Chen, C. Static Var Compensator Based on Rolling Synchronous Symmetrical Component Method for Unbalance Three-Phase System. IEEE International Conference on Industrial Technology, Hong Kong, December 14-17, 2005. 2006, IEEE. pp. 621-626.
- [21] Routimo, M. Developing a Voltage-source Shunt Active Power Filter for Improving Power Quality. Dissertation. Tampere 2008. Tampere University of Technology. 108 p.
- [22] Turunen, J. Series Active Power Filter in Power Conditioning. Dissertation. Tampere 2009. Tampere University of Technology. 179 p.
- [23] Nokian Digital Control: Function Block Library Reference Manual. Tampere 2010. Alstom Grid Oy. 140 p.
- [24] Wei, M., Chen, Z. A Fast PLL Method for Power Electronic Systems Connected to Distorted Grids. The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, November 5-8, 2007. 2007, IEEE. pp. 1702-1707.
- [25] Naidu, S. R., Mascarenhas, A. W., Fernandes, D. A. A Software Phase-Locked Loop for Unbalanced and Distorted Utility Conditions. 2004 International Conference on Power System Technology – POWERCON 2004, Singapore, November 21-24, 2004. 2004, IEEE. pp. 1055-1060.
- [26] Limongi, L. R., Bojoi, R., Pica, C., Profumo, F., Tenconi, A. Analysis and Comparison of Phase Locked Loop Techniques for Grid Utility Applications. Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, April 2-5, 2007. 2007, IEEE. pp. 674-681.
- [27] Xiaoqiang, G., Weiyang, W. Phase Locked Loop for Electronically-Interfaced Converters in Distributed Utility Network. Electrical Machines and Systems Conference, Wuhan, China, October 17-20, 2008. 2008, IEEE. pp. 2346-2350.

- [28] Rodríguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A.V., Liserre, M., Blaabjerg, F. New Positive-Sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions. Power Electronics Specialists Conference, Korea, June 18-22, 2006. 2006, IEEE. pp. 1942-1948.
- [29] Smith, S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. San Diego, USA. 1997. California Technical Publishing. 640 p.
- [30] Michel, D. Mixed Topology for Flicker Mitigation. Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Edinburgh, UK, 31 March – 2 April, 2004. (Conf. Publ. No. 498). 2004, IEEE. pp. 253-257.